Cambridge History of Science Series

剑桥科学史丛书

19世纪物理学概念的发展

能量、力和物质

[英] 彼德·迈克尔·哈曼 著 龚少明 译

复旦大学出版社

剑桥科学史丛书 Cambridge History of Science Series

19世纪物理学概念的发展

能量、力和物质

[英] 彼德 迈克尔·哈曼 著 龚少明 译

ENERGY
FORCE,
AND
MATTER
THE
CONCEPTUAL
DEVELOPMENT
OF
NINETEENTH
CENTURY
PHYSICS

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质/
[英]彼德·迈克尔·哈曼著;龚少明译.—上海:
复旦大学出版社,2000.2
(剑桥科学史丛书)
ISBN 7-309-02333-1

Ⅰ.1… Ⅱ.①哈…②龚… Ⅲ.物理学史-19世纪
Ⅳ.04-091

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第03451号

Energy, Force, and Matter The Conceptual Development of Nineteenth Century Physics

P. M. Harman

本书经剑桥大学出版社授权出版中文版

出版发行	复旦大学出版社
	上海市国权路579号 200433
	86-21-65102941(发行部) 86-21-65642892(编辑部)
	fupnet@fudanpress.com http://www.fudanpress.com
经销	新华书店上海发行所
印刷	江苏丹阳市教育印刷厂
开本	889×1194 1/32
印张	6.25
字数	168千
版次	2000年2月第一版 2001年1月第二次印刷
印数	3 001—6 000
定价	16.00元

剑桥科学史英文版编者

乔治·巴萨拉(George Basalla),特拉华大学(University of Delaware)

威廉·科尔曼(William Colman),威斯康星大学(University of Wisconsin)

剑桥科学史汉译编委会

主　编: 任定成　龚少明

编　委: (以姓氏汉语拼音字母为序)

曹珍芬,复旦大学出版社

丁荣源,复旦大学出版社

龚少明,复旦大学出版社

郝刘祥,中国科学院自然科学史研究所

刘　兵,清华大学人文社会科学学院

彭万华,北京大学科学与社会研究中心

任定成,北京大学科学与社会研究中心

苏贤贵,北京大学哲学系/宗教学系

田　洺,中国科学技术大学研究生院(北京)

袁江洋,中国科学院自然科学史研究所

周雁翎,北京大学科学与社会研究中心

英文版《剑桥科学史》总序

在西方世界智力劳动的成就中，科学的地位越来越突出。不管是出于宗教的目的，还是出于哲学上的探索，或者出于技术上创新的要求和经济上的考虑，科学的发展的确建立了自身独特的思想体系，而且还明确了专业训练和实践的具体标准。在这一过程中，又逐步建立了很有特色的社会团体和研究机构。相应地，科学——天文学，物理学及相关的数学方法，化学，地质学，生物学及医学的方方面面，还有关于人的研究——的历史，不但显示出极大的重要性和异常的复杂性，而且还为进一步分析研究提出了大量带有挑战性的难题。

半个多世纪以来，国际上有一批学者致力于各门科学的历史研究。他们的研究著作，只有具备相当水平的专业知识的读者才能真正理解，换言之，这类作者只热衷于为科学史领域的少数专业人士而写作。这就产生了一种悖论，即受过现代教育，并关注科学技术及其在人类生活和现代文化中的作用的人们，反而很难理解那些专门从事说明科学的概念演变和社会影响的学者的看法

《剑桥科学史丛书》的主编和撰稿者们却是那些既致力

于科学史的研究，又面向广大读者的作者群体。各书的作者熟悉各自专业的学术文献，但要成书却很不容易，因为他们需要在综合科学史的最新学术成就和相关结论的基础上，再向普通读者讲述西方历史中各个重要时期内的科学活动，还要对这些科学活动作出言简意赅的评价和分析。本套丛书中各卷都是一个相对独立的整体，全套丛书就描绘出西方科学传统的全貌。此外，各卷都罗列了与其主题相关的内容广泛的文献简介，以利读者深入研究时参考。

乔治·巴萨拉

威廉·科尔曼

《剑桥科学史》汉译弁言

科学是国际性的文化。以科学为对象的科学史，也是国际性的文化。了解国际学术背景并进而在国际学术背景下工作，是我们发展自己的学术事业的必由之路。

巴萨拉和科尔曼编辑的这套科学史丛书，历时近30年，从1971年至今共出版11部（1971—1975年由约翰·威利父子公司出版了其中的4部，从1977年起改由剑桥大学出版）。丛书的作者都是优秀的科学史学家。他们或者是国际科学史研究院院士，或者是国际学术组织负责人，或者是国际性学术奖得主，在国际科学史界占有重要的学术地位。他们以准确、精短的叙述和分析，继承了已有的科学史遗产，总结了新的科学史研究成就，纠正了对科学史的种种谬见和误解，勾勒出科学发展的复杂图景，为我们奉献了一批科学史著作的精品。

科学家们在他们的科学工作之外撰写科学史的历史相当悠久。

据说，欧德摩斯（Eudemus）在公元前4世纪写过天文学史和数学史著作。普罗克拉斯（Proclus）和辛普利西乌斯（Simplicius）分别在5世纪和6世纪有过关于欧几里得数学

史和前亚里士多德自然哲学史的论述。现代科学诞生即文艺复兴时期，古典权威的捍卫者和新科学的先驱都把历史作为斗争的工具。在他们心目中，只有历史古老性和权威性才是学术思想合法性最有力的论证。

到 18 世纪，科学家们撰写的科学史在两个方向上展开。在一个方向上，普里斯特利（Joseph Priestley，1733—1804）等人把科学史当作科学家们已经做的和能够做的事情的报告。其主要特征是按照作者所处时代关注的主题，着重描述相应专业的具体知识的演化，由此形成了科学家们塑就的持续至今的科学 – 历史传统。普里斯特利的《电学史》（1767）和《光学史》（1772）、蒙丢克拉（Jean Étienne Montucla，1725—1799）的《数学史》（1758）、巴伊（Jean-Sylvain Bailly，1736—1793）的《天文学史》（1775—1782），都是这个传统中的优秀范例。这个传统中的作品，有时候也被人们不太恰当地称为“内史”作品。与内史相对的另一种科学史传统被称作“外史”，因为它着眼于具体的科学知识之外那部分与科学事业相关的历史。在这个方向上展开的科学史，从斯普拉特（Thomas Sprat，1635—1713）开始。他撰写的《皇家学会史》（1667）是科学建制史而不是科学知识史。惠威尔（William Whewell，1794—1866）的《归纳科学史》（1837）可能是第一部科学通史著作。

19 世纪末 20 世纪初，迪昂（Pierre Duhem，1861—1916）的研究，开创了把科学史研究建立在严格的文献考证基础上的风气。可以说，到这个时候，科学史研究的学术传统和基本范型已经奠定了较为坚实的基础。与此相联系，随着科学的职业化及其社会地位的提升，一些著名科学家，如海克尔（E.H.P.A.Haeckel，1834—1919）、奥斯特瓦尔德

(F.W.Ostwald,1853—1932)等人,主张从根本上改造传统史学,用科学家取代国王在历史中的地位,用以科学进步为基础的历史取代以经济、政治、战争和外交为主要内容的历史,从而确认科学在文化中的支配地位。与此同时,考古学、人类学和语文学等学科取得的一些重要成就,进一步充实科学史的内容,丰富了科学史的研究范围。科学史的成就及其独立价值越来越得到社会的认同;借助一些具体的社会形式,科学史与其研究对象一样,也开始了其职业化进程。

科学史的职业化大致有这样一些外在标志:1892年,法国任命第一位科学史教授;1900年,第一届国际科学史大会在巴黎举行;1912年,萨顿(George Sarton,1884—1956)创办迄今最有影响的科学文化史刊物《爱西斯》;1924年,美国成立了国际性的科学史学会;1923年,辛格(Charles Singer,1876—1960)在伦敦大学学院创设科学史与科学方法系;1929年,国际科学史学会成立;40年代,哈佛大学授予第一个科学史专业的哲学博士学位;50年代,科学史终身成就奖萨顿奖章设立。现在,全世界的科学史或医学史研究机构已达数百个,著名大学几乎都设有科学史教学机构或研究生培养计划,重要的科学史学术刊物至少数十种,每年发表的科学史书籍或论文数千部(篇)。

要在汗牛充栋的文献中,保持审视不同科学史观、取舍恰当的科学史方法、辨识科学史方向和潮流、鉴赏优秀科学史作品的能力,对于外行,甚至职业科学史学家来说,都是一个相当困难的问题。感谢剑桥科学史丛书的编者,他们为我们选择了当代科学史著作的珍品,为我们了解这一领域的优秀成果提供导引;也要感谢剑桥大学出版社和复旦

大学出版社的精诚合作，特别是龚少明先生、林骧华先生的卓有成效的工作，感谢剑桥大学出版社版权部主任克里斯蒂娜·罗伯茨(Christina Roberts)和中国访英学者周午纵先生的热情帮助，经过众多译者的艰苦案头工作和出版社编辑的认真审校，这套丛书的汉译才得以问世。

剑桥科学史丛书从一定意义上反映出第二次世界大战以后世界各国科学史领域的重大成就。丛书既为文化史和各相关专业的学生和学者提供了高水准的参考书，又为一般读者提供了了解科学文化发展的指南。每部书末附有进一步的阅读文献，其间夹有作者对相应文献的简要评介，为有兴趣者进一步研究指出了门径。更为可贵的是，丛书在论述过程中渗入了科学史的现代研究方法和思维方式。应当说，寄寓于优秀科学史著作中的科学史观和科学史方法，是最有生命力的。

我国改革开放以来，已经翻译出版了不少优秀的科学哲学著作和一定数量的科学社会学经典著作。相比之下，优秀科学史著作的翻译出版相当薄弱。从学术研究的角度看，这种情况不仅不利于国内科学史界了解国际学术背景，而且也使科学哲学和科学社会学研究缺乏必要的科学史基础。科学哲学和科学社会学的深入研究，离不开对新的重大的科学史成就的分析、诠释和概括。这套丛书的翻译出版，如能为相关学术领域研究的深入发展起到一些积极的作用，则幸甚。

任定成

1999年12月于承泽园

序 言

从1800年到1900年的一百年，是物理学概念发展史上的一个特别时期。在这百年中，物理学涉及的范围不断扩大，从18世纪晚期物理学沿着量化和寻求数学的规律性开始，到根据力学解释纲领建立统一物理学，再到20世纪初量子论和相对论的出现。我的目的，是要为对物理学和数学缺乏了解的读者，提供一本容易理解的关于19世纪物理学概念如何发展演变的书籍。本书的重点在于构架19世纪的几个重大概念问题：能量物理学和热力学的出现、发光以太和电磁以太的理论、场论的概念、分子物理学和统计热力学、以及力学解释纲领的主导地位等等。本书的阐述是从19世纪上半叶物理学的范围如何一步步拓展入手的。

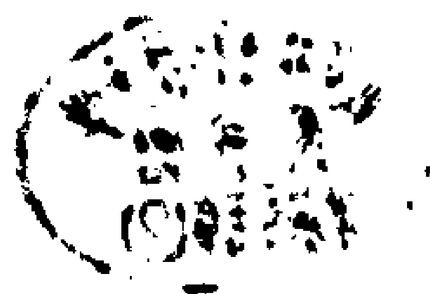
我非常感谢约翰·海尔勃龙(John Heilbron)阅读了本书的部分手稿，还要感谢克罗斯比·史密斯(Crosbie smith)阅读了本书的全部手稿，他们还对书稿提出了有益的意见。我也十分感谢剑桥大学图书馆管理委员会很慷慨地允许我使用他们收藏的文史资料，同时还要感谢皇家学会给我提供承担本书撰写的研究基金。

内容简介

本书以不具备专门的物理和数学知识的读者所易于读懂的方式，简洁地说明了19世纪物理学的理论框架。作者哈曼博士对这百年时间里的重要概念和理论的进展进行了系统的讨论，着重讲述物理学家在机械论基础上千方百计地建立他们的理论的过程。

本书通过对19世纪物理学家所面临的概念问题的集中讨论，阐明了场论、以太、热力学在这百年里的地位，由于作者对他的学科所具有的正确的历史观，使他能够对这段时间里的科学发展以及出现的困难作出高度概括的说明，本书开头描绘了19世纪早期物理学的学科范围，再以爱因斯坦早期工作为结尾。

无论专家学者和科学史的学生及广大读者都会欢迎这一研究成果。它告诉你经典物理学和近代物理学之间的相关性和差别所在。



目 录

第一章
引论:19世纪物理学的概念结构

19世纪,"物理学"这个术语的涵义发生了新的重大变化。尽管这个术语从传统意义上有时仍被用来泛指自然科学,但在19世纪的早期,"物理学"已以近代的更加专门的意义,用来表示采用数学方法和实验方法去研究力学、电学和光学的科学。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)在19世纪70年代出版的《不列颠百科全书》第九版的一个题为"物理科学"的条目中,明确规定了能用力学纲领解释的科学为物理学,首次明确了17世纪以来逐步形成的"世界的机械论图象"的历史地位,亦即表明了运用力学体系的结构和运动定律去解释物理现象的观念是正确的。约翰·伯恩哈德·斯特洛(Johann Bernhard Stallo)在1881年的《近代物理学的概念和理论》一书中,写了一篇针对当时的物理学理论的评论文章,文章中对物理学的理论框架下了一种为当时的理论家们普遍赞同的、前瞻性的且更加详尽的定义[①]:

> 物理科学,除了研究动力学的普遍定律并将这些定律应用于固体、液体、气体的相互作用系统之外,还包括那些所谓

① Stallo, Concepts and theories of modern physical, reprinted. (Cambridge, Mass., 1960), p.60

的不可称量因素的理论，亦即包括所谓光、热、电和磁等等的理论；再者，所有这一切眼下都一并作为不同的运动形式来看待，亦即作为一样的基本能量却以不同的表述方式来加以对待。

19 世纪，物理科学的涵义越来越明确：能量概念和力学解释纲领两方面的术语的作用是一致的。

能量概念为物理科学提供了一个全新的统一的理论框架，借此，包括热、光、电及力学在内的一切物理现象都可以在力学自然观的范畴内，采用统一的概念框架给以解释。19 世纪物理学发展的主题是理论革新的方式问题，亦即根据力学自然观，假定运动着的物质是一切物理现象的基础，如何系统地确立物理场的概念、发光以太和电磁以太理论以及能量守恒和耗散的概念等问题。

本书的讨论重点是如何构建 19 世纪物理学的框架的核心问题。首先，我将对 1850 年前后物理学这门特殊科学的发展状况作些简洁的描述：采用定量描述，以寻求数学规律为普遍目标，以建立能量守恒定律为统一原理，以力学解释纲领作为物理理论的支柱。于是，19 世纪的物理理论框架就是集中力量分析这期间物理学中能量、力、物质等概念的地位。我将阐述能量守恒原理和耗散原理的发展，物理“场”（说明物体间通过中介的“场”的作用来传递力）的理论，以及分子物理的研究。讨论中还包括预备性知识的总体介绍，使读者大致了解 19 世纪物理学概念发展的总体状况。

物理理论的核心

19 世纪物理学理论中，力学现象是在数学基础上加以研究的，至于原子和力的性质的假设却是回避的；相反，对热和电的解释，通常又假定热和电为不可称量的“流体”并认为这些“流体”的粒子和普通物质的原子之间存在假设的作用力。尽管 18 世纪后期，采

取了各种尝试，试图从数学上解决热和电的问题，并且这些尝试已成为统一物理科学概念的良好开端，但从总体上看，这些猜测性的定性理论同力学科学相比，其准确性、定量化都相去甚远。下述四方面的进展，为建立统一的物理学奠定了可靠的基础。

1．P·S·德·拉普拉斯（P.S. de Laplace）及其追随者，建立了一种既适用于力学，又适用于热学和光学现象的关于粒子间的力的普遍的数学理论。尽管在1815年—1825年的10年间，随着热学和光学的最新进展，这一理论已经被抛弃了，但是拉普拉斯的数学化和公式化对统一的物理世界观，乃至对以后物理学理论的发展都产生了深刻的影响。

2．1822年约瑟夫·傅里叶（Joseph Fourier）关于热的数学理论的发表，把原先只适用于力学问题的数学分析方法，应用到热学的研究之中。在磨合这种概念上的传统差别及强调数学表述和物理表述的差别时，傅里叶的工作对建立统一的物理学产生了深远和广泛的影响。19世纪40年代，威廉·汤姆孙（William Thomson）受到傅里叶的热理论和静电学理论两者数学类似性的启发，一方面，研究了热学定律和电学定律之间的数学类似性和物理类似性，另一方面又探索了质点力学同流体力学及弹性力学之间的数学相似性和物理相似性。汤姆孙通过这种物理比较方法，亦即通过同一种数学形式所反映不同现象之间的概念联系的方法，加深了人们对物理现象的统一性的认识。

3．A·J·菲涅耳（A.J. Fresnel）关于光的波动说，假定光是依靠力学以太的振动实现传播的，因而光学又纳入到力学自然观的范畴之中了。大约19世纪30年代，光的波动说已被普遍接受，物理学家试图寻找一种合乎逻辑的光的机械论，为此探索了多种多样的物理理论和数学理论。光以太的机械论又为力学解释提供了一个典型的普遍性事例。

4．19世纪40年代，能量守恒定律的建立又加强了物理学的统

一性，它使热、光、电、磁的现象都归并到力学原理的框架之中。19 世纪初期，物理学家研究了光和热的相互转化以及电和磁的相互转化问题；1820 年 H·C·奥斯特（H. C. Oersted）的实验和 1831 年迈克尔·法拉第（Michael Faraday）的实验，确立了电力和磁力之间的联系，他们的实验证明自然界的'能'或'力'的统一性和可转换性的学说的正确性有着特别重要的意义，这里'能'或'力'的概念就是 19 世纪 40 年代建立'能量'守恒原理中的'能量'的概念。詹姆斯·普雷斯科特·焦耳（James Prescott Joule）的实验确立了热和机械功的等当性，赫尔曼·冯·亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz）在 1847 年发表的一篇极有创意的论文中，把这些现象表示为能量的不同形式，从而说明了力学、热学、光学、电学和磁学之间的关系。亥姆霍兹强调指出，能量概念是力学自然观的另一种表述方式，他所建立的能量守恒定律也是数学和力学的一个定理。

1850 年前后，能量守恒定律为在力学自然观基础之上建立物理理论提出了一个全新的框架，这种理论框架排斥物质多样性的假设，认为运动着的普通物质的粒子才是物理学说的根据所在。关于光、热、电的物理学概念问题，就需要根据它们的数学分析的要求来建立，这又进一步充实了物理学统一性的基础。

能量物理和力学解释

热和机械功的关系是 19 世纪物理学研究中头等重要的问题。'热力学'定律的建立架设了力学和热学之间的桥梁，而且有利于确立力学自然观的主导地位。同 18 世纪时物理学家认为力学过程和非力学过程分属不同物理系统的看法不同，焦耳在 19 世纪 40 年代对热功等价性的演示以及能量守恒定律的确立，认识到力学过程和热学过程是统一的。

热力学科学既关系到功所产生的热流的方向，也涉及到热功等

当量原理的建立。鲁道夫·克劳修斯(Rudolf Clausius)于1850年在建立热力学的概念基础时，解决了由汤姆孙所提出的问题：焦耳要求对外作功时消耗的热量同1824年塞迪·卡诺(Sodi Carnot)提出的热机理论两者之间存在着明显的矛盾。卡诺证明，热机对外作功的决定性因素是热机的温度差：热量从高温物体向低温物体的流动时才产生输出功，在此过程中热量本身的量是不变的。克劳修斯认为，只要抛弃热机在对外作功过程中热量守恒的卡诺假定，则热机对外作功时热量从高温物体流向低温物体的卡诺理论就和焦耳的由热量转化为功的论断相一致，即损耗的热量正比于对外所作的功。焦耳的原理和克劳修斯修正的卡诺理论奠定了建立热力学两个定律的基础。

汤姆孙和克劳修斯用力学自然观的术语建立了热力学科学，他们坚持的热功等当量原理是同热的机械论一致的：热是由物体粒子的运动引起的。汤姆孙坚信自己在支持力学自然观的同时，又回避了对热过程提出任何模型假设。相反，克劳修斯试图最终提出只借助分子运动论来理解热力学的定律。

提出分子分布模型已成为热力学第二定律的克劳修斯解释的根本所在。1851年汤姆孙本人在解释热力学时指出，核心问题是如何解释不可逆热学过程的问题。根据汤姆孙的看法，热力学第二定律应该阐明：不可逆过程中会有能量的损耗。即使不可逆过程中有能量的损耗，热力学的两个定律还是自洽的，亦即能量并没有消失，只是转变为其他形式的能量罢了。在19世纪50年代和60年代，克劳修斯试图建立这样的概念，亦即不但可以量度热力学过程的方向，还能阐明不可逆过程的性质。他用所谓“熵”的概念来说明物理过程的方向特征：熵增加定律成为热力学第二定律的惯用表述形式。克劳修斯试图在分子分布和分子运动的力学模型基础上建立熵并解释熵，他认为这种模型本身的地位要比熵概念更加基本。

虽然熵和分子分布模型的关系是一个有争论的课题，物理学家们还是赞同由热力学定律所提出的力学自然观。汤姆孙坚信能量的所有形式都归属于机械能，并且千方百计建立以力学自然观为核心的能量原理。在 19 世纪 50 年代和 60 年代期间，汤姆孙和 W·J·麦克柯恩·兰金（W. J. Macquorn Rankine）根据能量概念这一特定要求，试图通过自然'力'的转化学说来重建和推广能量守恒原理的数学基础和物理基础，精心建立物理学的理论框架。汤姆孙和彼得·戈塞里·泰特（Peter Guthrie Tait），在能量和力学解释的基础上，于 1867 年发表的"论自然哲学"，就是在机械论的概念框架内确定能量的，这篇文章已成为新物理学框架的教科书。

以太和场论

物理"场"的概念，大约于 1850 年首先是在英国的物理学中建立起来的。根据"场"的概念，假定电力和磁力分布在空间并以物理场的形式作为中介来传递作用力；为了解释场的物理分布情况，随着以太的机械论的研究工作的深入，场的概念亦得到不断的发展。早在 19 世纪 40 年代和 50 年代，法拉第证明电力是借助周围介质的粒子来传递的，他还用"力线"的概念来描述电磁力在空间的分布。这些理论奠定了场作为中介作用的概念基础，即场充斥在带电体或磁体周围的空间中。汤姆孙和麦克斯韦在 19 世纪 50 年代建立电磁理论时，就是借助了场的概念，而不是提出电磁体通过有限空间的所谓直接的"超距"作用的假设来建立的。

为了解释场的物理结构，汤姆孙假定，场的作用可用以太中的分子旋涡来描述；但是后来汤姆孙设想以太是一种充满空间又代表力场的所谓连续的以太介质。19 世纪 60 年代麦克斯韦建立了场的一系列物理理论和数学理论，他吸收了法拉第的物理思想，也采纳了汤姆孙的分子旋涡的概念，并且精心建立了一种场的力学模

型:借助以太中粒子的作用来传递力的作用。麦克斯韦在1861年建立的物理以太理论,是描述电力、磁力传播机制的系统理论,他所采用的所谓力学以太模型原本只是一种解说模型,并不表示对以太的最终物理解释。他在1865年发表的论文里,又对他的场论作了修正,尽管他继续坚持自己的力学解释,强调电磁现象是同以太中的物质粒子的运动相关的。但他放弃了为场建立特殊力学模型的其他尝试,而是采用拉格朗日的分析力学方法,亦即采用不受任何特定力学模型限制的普遍形式来研究场。

电磁场的麦克斯韦理论有着意想不到的丰富内涵:电磁波在以太中的传播速度与光速完全相同。这一点使麦克斯韦在论证电磁以太和发光以太完全一致的过程中确立了他的"光的电磁理论":光是以太中的电磁振荡,光学和电磁学是统一的,这也是以太机械论的基础。1888年海因里希·赫兹(Heinrich Hertz)公布的电磁波的实验观测,立即证明电磁场理论是高度准确的。对于欧洲大陆的物理学家来说,他们特别注重麦克斯韦的电磁场理论,并以此来取代19世纪由德国物理学家所提出的种种所谓超距作用的理论。

到了19世纪90年代前后,对物理场的概念有多种多样的解释。有不少英国物理学家试图将麦克斯韦的电磁理论和汤姆孙的以太连续介质的概念统一起来,另一些物理学家则提出一组并不是建筑在力学以太模型基础之上的电磁场方程。其中最主要的办法是由H·A·洛伦兹(H.A.Lorentz)所发明的,他提出只以电磁学概念来建立普遍物理学。洛伦兹的理论同样可以解释19世纪80年代由A·A·迈克尔孙(A.A.Michelson)和E·W·莫雷(E.W.Morley)所做的实验,这个实验在解释以太和物质的相互关系时出现了严重的困难。根据洛伦兹的"电子"理论,设想物质是由荷电粒子(电子)所组成,以太同物质的关系则用电子与电磁场两者的关系来解释。洛伦兹认为电磁场就是没有力学性质的以太而不是力学自然观。直到1900年,以太和场论的发展才对力学自然观提出了挑战。

分子物理学的问题

在 19 世纪 50 年代和 60 年代，随着克劳修斯和麦克斯韦所提出的气体运动论的发展，力学自然观又得到了一次新飞跃。气体运动论，假定气体是由运动着的物质粒子所组成的，物理学家从此开始了物质分子论的研究工作。19 世纪的整个后半期，物理学家就是在气体运动论的基础上来推测物质的性质的，不过他们很快就明白：这一理论无法很好地解释分子的结构。况且光谱线的结果表明，从气体理论导出的分子结构结论也是矛盾的。这些问题引起了对分子模型的性质产生了很大的分歧，对运动论的质疑使人们对力学自然观的完整性提出了挑战。

物质分子论的问题同样也反映到热力学的解释之中。麦克斯韦的气体理论是他在引入分子运动的统计理论的基础上建立起来的，他是在讨论热力学第二定律时采用这一理论的。麦克斯韦引进他的“妖”佯谬来证明，只有在大量分子运动的统计解析基础上才能对第二定律作出分子解释。他注意到，各个分子都可能持续不断地发生自发涨落。正是分子随机运动的涨落才使热量从较热物体传递到较冷物体，但是这些涨落并不违背热力学第二定律。热力学第二定律本质上是一个统计定律，只适用于大量分子，不适用于个别分子的行为；因此，正如克劳修斯提出的，对该定律的一切解释都不能建立在个别分子运动理论的基础上，否则就是错误的。

路德维希·玻耳兹曼（Ludwig Boltzmann）在 1877 年所写的创造性论文中，建立了熵和分子运动的统计分析之间的联系，这一关系式把自然过程中熵的不可逆增加用统计定律来表示。玻耳兹曼采用分子运动的统计理论来解释热力学第二定律，并努力维护自然界是由运动着的物质粒子所组成的机械观。到 19 世纪 90 年代，热力学的这种解释开始受到打击。马克斯·普朗克（Max Planck）强调指出，

熵概念是绝对合理的，他批评玻耳兹曼用统计概念来解释熵的观点。普朗克认为，从气体运动论导出的熵是很难解释和理解的。对这种用物质运动的力学原理来解释熵的观念的否定，又构成了对力学解释的全部原则的威胁。

力学解释的地位问题

虽然19世纪90年代力学解释的原则受到了冲击，但力学（经常称为'动力学'）的世界观，亦即假定运动着的物质粒子是决定物理实在的依据的所谓本体论仍占19世纪的主导地位。这里，术语'本体论'是表示物理实在的基本构成的某种假设，它不同于特殊的假设或不同于实在的模型。运动物质粒子的'动力'论的本体论是19世纪物理学的指导原则，物理现象则根据力学系统的结构和运动定律来加以解释。但是，物理学家认识到，力学世界观的本体论解释和描述物理现象的假设性力学模型的发明，两者是有区别的；此外，物理实在同它的符号表述之间的关系也是相当重要的课题。很多物理学家强调指出，物理实在的构造和所用的理论宗旨之间总有差别，并且讨论用力学模型来描述现象的观念本身的地位总是伴随着关于物理实在的性质而引起争论，并使力学解释成为有条不紊的表述纲领。

物理学家用三种方法来进行力学解释。首先要求建立物理组成粒子的构型及其运动的理论，旨在通过对物质粒子的安排，并设定粒子间的作用力再去解释自然现象。力学解释的第二层意思是设定力学模型，亦即描述诸如轮子、弹簧等等假设模型，为了描述现象也可以设计出活动的机械元器件。这些力学模型不一定代表物理实在的真实表示，但是通过对模型的演绎，原则上可以描述所发生的现象；机械元件有助于对现象的理解。第三层意思是：在进行力学解释的过程中要尽量避免这样的推测：为了描述现象而强加

给力学系统的物理结构上的猜测。利用这一方法的理论工作者认为：任何现象只建立唯一一种力学模型是不恰当的，因此要求采用拉格朗日分析动力学的抽象形式。这样得到的运动方程同力学系统的连接结构无关，但是，说到底各种现象还是属于力学解释纲领之下的一类现象，只不过并不是用特定的、具体化的力学模型来表示罢了。

力学系统的物理模型和数学模型之间存在着严格的对应关系，力学表述和物理实在之间也存着对应关系。在关于 19 世纪物理实在性的理论发展过程中，这种对应关系发挥了相当重要的作用。麦克斯韦就是熟练地运用了这种严密的逻辑推理关系，认真地讨论了这些问题，所谓假设的正确性的争论导致了系统化的物理理论的建立，并且为这段时间新理论的提出奠定了基础。19 世纪的很多物理学家都知道理论和客观实在间的差异，他们也注意到力学解释纲领的局限性和客观真实性问题。

物理学的编年史

20 世纪物理学概念发生了深刻的变化，在爱因斯坦的相对论问题以及量子力学的因果性理论和决定论里，人们抛弃了绝对的时空观，这就很自然地通过从‘经典’或‘牛顿’物理学跨入‘近代’物理学的阶段，从而促进了物理学的发展。18 世纪和 19 世纪的物理学是作为一个整体用同样的概念结构来加以解释的，这种概念结构的特权由于‘近代’物理学的出现而丧失了，而且这种特权又深深地埋在科学史的背景中。17 世纪所谓的‘科学革命’延缓了这种传统的解说，这场智力革命的涵义对后来科学发展的影响却被误解了。这场科学革命传统上以哲学革命为特征，根据这一特征，所有自然现象都可以归纳为力学定律而加以解释。这种‘世界图象的力学描述’以牛顿关于力学和天文学的综合评述为顶峰，牛顿力学和

力学解释纲领的建立被看作为此后两个世纪'经典'物理学的总框架。

虽然 17 世纪自然观的变化状况是深刻的,但它错误地把这种变化标榜为科学革命,这种标榜意味着后来的进展似乎都可以用这段时间所提出的科学范畴的问题来加以理解。18 和 19 世纪物理学用到的'牛顿'物理包含牛顿的自然哲学和此后所谓的物理学的总和,因此'牛顿'这一术语是一个容易误解的术语。18 世纪理论力学的发展表明:牛顿自然哲学的力学假设和数学假设两者相差甚大;而且 18 世纪的不可称量'流体'、有源物质、物质流的不寻常形式等物理学又与牛顿的自然观相悖,尽管牛顿的纯理性文章影响了这些物理学理论的总体状况。不顾力学解释纲领所发挥的主导地位如何突出,也不管偶然求助'牛顿'理论(正如拉普拉斯的吸引力和排斥力的理论)的实际情况如何强烈,19 世纪时,当把术语'牛顿的'应用到物理学中时,常被人误解了。19世纪物理学的概念涵义——能量守恒、物理场的理论、电磁以太振荡的发光理论,熵的概念——都不可能再执意表示为'牛顿的'了。经典物理学的图像是一个整体,它构成一种统一的世界观,尽管 18 和 19 世纪的物理学发生了惊人的变化。当我们在将 18 和 19 世纪物理学的哲学假设同 20 世纪物理学的相对论和非决定论作区别时,虽然'经典的'一词还是适当的,但'牛顿的'这个术语用于表示 19 世纪物理学的结构和内容时却发生了歧义,因为它的使用常常使这期间的概念原理和物理世界观两者的界线很难划分。

第二章

物理学理论的核心：能量、力和物质

无论从风格上看还是从内容上看，1850年的物理学理论都同1800年盛行的理论形成了鲜明的对照。1850年时，'物理学'的学科范围以及学科内容的协调性都极为美妙，物理学作为一门完整的学科，已经达到了概念准确、逻辑统一的新阶段。1850年前后，19世纪物理学的最重大的根基已经明确了：物理现象都可以用一种统一的框架来解释，即以力学解释为原理的出发点，通过数学描述对物理现象作模拟并导出描述现象的数学方程式，再冠之以普遍的定律——能量守恒定律。这些广泛、统一根基的建立是1800年时的物理学理论无法比拟的。

我们可以从牛顿的《自然哲学的数学原理》(1687年)和他的《光学》(1704年)两本著作的比较中，看出18世纪物理学升迁的大致情况。在《原理》中，牛顿提出了"理性力学"的数学科学的范例，但在《光学》中，虽然他希望所有的物理现象都可以根据相应的数学方法来加以分类(从对光衍射的数学描述中可说明他的这种旨意)，不过他对光学和化学问题的处理方法，则是建筑在实验方法、推测的理论框架以及原子物理学的基础之上的，并且随着《光学》一书的版本的不断更新，这里的基础又不断拓宽到包括力、有源原

理、以太等多种多样的解释机制。这种关于方法和模型上的演变在18世纪物理理论著作中都有所反映。

牛顿在《原理》中表达的数学自然观,是16和17世纪数学革命的根基。牛顿吸收了笛卡尔的解析几何学,使他的数学方法从具体走向抽象,亦即从形象表述过渡到反映几何量相互关系的方程表述。微积分的方法是由牛顿和莱布尼兹各自独立地发展起来的,这种涉及到对无穷小量的描述的微积分,对于物理学中力学问题的求解,尤其是对力和运动变化的研究,具有非凡的作用。在《原理》中,牛顿用一系列无穷小的线段来描述行星在引力作用下沿曲线的运动,引力则用一组离散的力脉冲来表示。欧洲大陆的数学家利用莱布尼兹的微积分所做的大量工作,极其成功地解决了力学问题。物理量之间的关系,可表述为用代数符号描述的几何量之间的关系。18世纪从几何学分离出来的解析方法,使物理量的数学表述十分灵活。数学符号摆脱了它们的几何基础并被直接用来描述物理量,这是一个使复杂的物理概念易于数学描述的过程。欧洲大陆的几何学家,包括约翰·伯努利(Johann Bernoulli)和他的儿子丹尼尔·伯努利(Daniel Bernoull)、吉恩·达朗伯(Jean d'Alembert)以及莱昂哈德·欧拉(Leonhard Euler)等人都对流体的力学问题和弹性介质的力学问题做了很好的数学分析工作。根据'理性力学'的传统做法,力学的数学定律必须根据质量、长度和时间的经验概念来建立,并且应当避免使用不可观测的、假设性的解释。

物理现象的数学处理在力学研究中达到了登峰造极的地步。虽然牛顿关于光的'辐射'理论(认为普通的物质粒子和光微粒之间的相互作用使普通粒子受到力的作用)和欧拉的光学理论(认为光是流体中的脉动传播)都是建立在数学论证的基础之上的;但是人们常常把光比拟为'火',并且用不可称量流体'以太'来描述。这种'流体'被设想为由互相排斥(用'弹性'表示这一性质)的粒子所组成,而且是'稀薄透明'的(它可以穿透普通物质粒子间的空

隙),并且这种以太粒子还受普通物质粒子的吸引。当这一理论用于电学、热学和化学时,用粒子间的力和以太流体的假设可以得到解释。

牛顿所提出的以太和粒子间的作用力对这些理论发展轮廓产生了重要的作用,牛顿在《光学》的各种版本的附录中特别提到那种推测的'问题'(Queries)。在对牛顿工作的评论中,人们特别关注牛顿的短程吸引力的概念,这种模型确定了化学理论的基础:由此又可以构想一门涉及化学作用力的定量物理学,多种多样的化学元素就是由力相连着的终极原子的各种不同的结构。到了18世纪中期,法国的化学家为了解决化学反应的关键问题——探索化学力('亲和力')——的论证过程中,在他们的著作中稳固地建立了这一理论,虽然人们想了许多办法试图使化学力的这一理论达到定量的水平,但是理论的主要方面仍然停留在定性的水平上。大约到了18世纪40年代,人们对牛顿的斥力概念发生了兴趣,在牛顿的'稀薄透明'并具有'弹性'的以太观念的鼓舞下,人们设定以太粒子以斥力形式发生作用。荷兰化学家赫尔曼·博依尔海维(Herman Boerhaave)的所谓"火"的概念被作为能抵消普通物质吸引力的有源原理而引起关注,由此还导致关于自然界的二元论的产生。本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)的电学理论断定普通物质的二元论是对的:普通物质粒子的力为吸引力,同时构成电'环境'的周围粒子的力为排斥力。所谓带电的模型是指带电'流体'填满带电体的间隙毛孔。这样的电物质既同牛顿的以太相似,也同博依尔海维的'火'相似。到了18世纪末,科学家都采用了不可称量流体去解释电、磁、光和热的现象。虽然理论家们试图采用多种流体去解释多种不同的现象,比如用一种或两种流体去解释电学现象,用另一种流体去解释热学,亦即用'热素'作为燃烧过程中的不可称量流体;此外还提出一种统一的以太理论,根据这一理论,不可称量流体就是以太的各种变种。这种二元论的世界观,通过某种以太的、有源

的、排斥性的物质的传递力同普通物质间的吸引力达到平衡。

18世纪时，人们对热、磁、电等现象的研究还是定性的。但到了18世纪末期，人们逐步采用定量的数学方法去研究这些现象，而且这种数学方法还由于科学仪器精度的提高和物理学专业化程度的提高而得到了进一步的发展。约瑟夫·布莱克(Joseph Black)、A·L·拉瓦锡(A.L.Lavoisier)和拉普拉斯等人对热学的研究工作，T·迈耶(Tobias Mayer)、J·H·拉姆伯特(J.H.Lambert)和C·A·库仑(C.A.Coulomb)对静电学的研究工作，都利用了精细的实验测量和定量的水平来衡量理论好坏的判据。静电学的定量化，建立了静电力的定律，这是精确实验检测和定量化研究方法的结晶，也是从方法论角度寻求建立数学定律的一个范例，它对实现19世纪物理学的特定目标是极其重要的。

拉普拉斯的物理学

粒子间相互作用力理论和不可称量流体的理论，经过皮埃尔·西蒙·德·拉普拉斯(Pierre Simon de laplace，1749年—1827年)和他的学派研究之后，在19世纪的最初20年里达到了它的最美妙的顶峰。拉普拉斯证明：光的折射、固体附着力、毛细管的作用、化学反应等等都是同物质粒子所施加的吸引力密不可分的；拉普拉斯坚持认为：对粒子间短程力规律的深入研究可使地球物理的研究工作，像牛顿的万有引力定律在研究天体物理时那样，达到高度完美的水平。拉普拉斯的研究工作不完全都是从零开始的；A·C·克莱奥特(A.C.Clairaut)在18世纪30年代和40年代在他的论光的折射和毛细作用的论著中，讨论过短程分子力的数学理论。但是拉普拉斯在1805年发表的《论天体力学》[1]中阐述了折射和毛细作用，在两年

---

[1] P.S.de Laplace, *Traite de mécanigue celeste*, 5 vols(Paris,1799—1825),5:99

后出版的补充材料中拉普拉斯又用分子力的术语对这些现象作了系统的用数学式子表示的说明。拉普拉斯强调指出，他的这一解释办法是普遍适用的，不过后来的实验观测表明，他的理论应用到热学、光学现象和毛细作用理论时同观测结果相差依然很大，“在力学的论证过程中引入这种分子力研究也许是有用的”。从本意上讲，拉普拉斯反对牛顿的理性力学的传统，赞成在对分子运动和分子力假设的基础上建立一种崭新的普遍的物理学。这种物理学既适用于力学问题，又适用于光学、热学和电学现象，从传统意义上说，这些现象的解释只有利用粒子间的力才能办到。西蒙·丹尼斯·泊松[①]（Simiéon Denis Poisson，1781年—1840年）把这种办法的原理说得十分清楚：这是一种‘物理力学’的理论，它可以取代18世纪数学家在研究力学问题时培育起来的‘分析力学’。泊松强调指出：当研究灵活的弹簧、弹性的表面和流体的压强时，可以采用分子力的理论来解决这样的力学问题。

拉普拉斯学派强调的统一性，使力学和热学、光学、电学等现象间互相沟通，尽管建立在对分子力推测基础上的拉普拉斯的物理力学的概念已经陈旧，但这种统一性还是促进了19世纪物理学的发展。拉普拉斯重视以精细的实验测量工作作为他的数学物理理论的重要补充，他认为实验方法和数学理论并重。J·B·毕奥（Jean Baptiste Biot，1774年—1862年）指出拉普拉斯在他的影响深远的《论实验物理和数学物理》（1816年）中，强调通过采用新的仪器设备和新的实验方法，提高实验精度，减小误差，亦即物理量的精确数值测量是极端重要的。毕奥把数学方法和实验方法都看作为物理学的范例，认为定量描述才是物理理论的目标。

拉普拉斯设想了一种包括不可称量流体理论在内的定量化的物理学。他的热理论和气体理论都是建筑在推想的基础上的：热作

---

① S.D.Poisson, *Memoires de éAcadimie des Sciences*, 8(1929), 361

为一种不可称量的流体,渗透在物质粒子的周围,拉瓦锡及其同事把这种流体称为'热素'。热素的性质随着它同普通物质混合时的状况的改变而改变。气体的弹性要比液体、固体好,是因为气体粒子间渗进了比液体、固体粒子间更多的热素之故。拉普拉斯认为,普通物质粒子间的吸引力和热素粒子间的排斥力之间的关系是气体性质的决定因素。热素说加上拉普拉斯的定量物理学,使拉普拉斯的气体理论达到了相当完美的程度。

拉普拉斯在将自己的分子物理的研究方法推广到普遍的应用过程中时,得到了同他的同事克劳德·路易斯·贝陀莱(Claude Louis Bertholler,1748 年—1822 年)相一致的结果。贝陀莱证明化学亲和力是由物质粒子间的吸引力引起的,他认为化学亲和力和引力的性质很可能是相似的。贝陀莱的细致研究工作,揭露了建立化学亲和力图表过程中的固有困难:既不能对化学物质彼此化合的相对趋势进行分类,也不能对化学物质吸引力的差别进行定量的测量。他强调指出,物质的化学活性不完全简单地取决于它们的亲和力,还取决于它们的质量。化学现象的复杂性很难找到建立亲和力的物理学的定量办法,因此它的应用前景也不乐观。但是,贝陀莱系统地应用数学表示的化学,的确奠定了亲和力的很有逻辑性的理论基础,这是一种关于分子力的理论,对拉普拉斯说明他的分子物理的研究方法是很有帮助的。

拉普拉斯在拿破仑时代法国的物理学界的影响是至高无上的,他对分子力理论的研究,凡是有利于他的理论取得成功的重大问题的定量实验测量和数学运算,国家都给予特殊的支持和鼓励。毕奥和 F·阿拉戈(Francois Arago,1786 年—1853 年)对光在气体中的折射现象作了实验研究,坚持认为他们的实验观测提出了对分子力的一种量度办法。E·L·马吕斯(Etienne Louis Malus,1775 年—1812 年)对双折射现象的拉普拉斯谱线提出了一种解释办法,这就证实了这样一个问题:拉普拉斯用他的分子力的理论来解释光学现象是适当

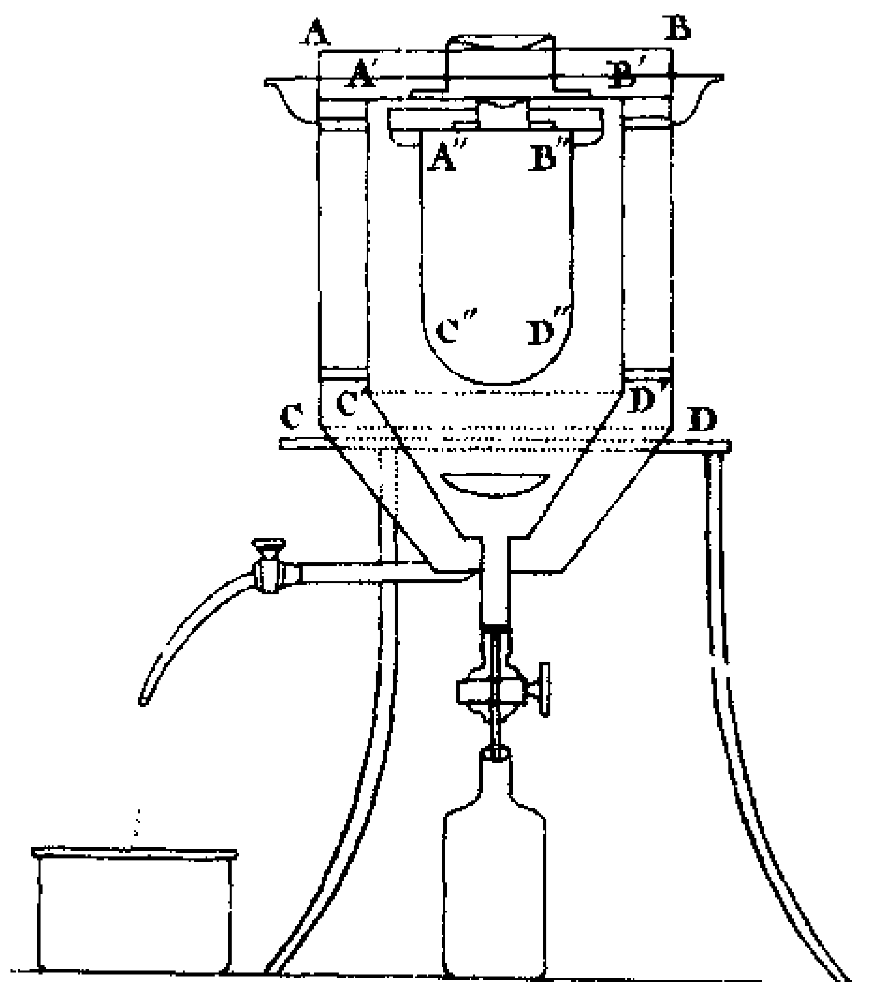


图 2.1 拉瓦锡和拉普拉斯采用的'冰量热器'。该装置高约 3 英尺，由三个颈部套在一起的同轴金属圆筒所组成。外圆筒里盛着碎冰块，使内圆筒与外界隔热，最里面的圆筒是内中悬挂着金属网篮（网篮内装上待测物质样品）的容器，由于网篮中的物质产生热量，使紧贴着的一层冰融化。冰融化所产生的水流到下端的容器，称出水的重量。融冰的重量与物质释放的热量成正比。拉瓦锡和拉普拉斯测出了多种物质的比热，亦即测出了各种等量物质上升相同温度所需要吸收的热量（以水的比热为标准值，并取为 1）。除了实验装置之外，这里的实验方法是属于拉普拉斯的。

为了对物理量进行准确的数值测量，本实验的确是精确实验的一个重要实例，这也是毕奥在物理学综论中所强调的定量化的思想的具体体现。在拉瓦锡和拉普拉斯的论文中，他们强调的是对热的性质不作任何假设，但后来他们还是相信了热素说，毕奥也持这一看法。量热学的兴起、热量概念的发展，以及物质比热、潜热等概念的产生，都促使人们把热的概念建筑在热素说与材料物质相结合的基础上。[资料来源：Jean Baptiste Biot, *Traite de physique experimentale et mathematique*, 4 vols (Paris, 1816), V, fig. 66]

的。马吕斯在报道他的关于光的偏振的发现中,也得出了一种在假设基础上的解释理由,即假定光微粒和普通物质粒子间的分子力的作用使光出现反对称的性质.

同贝陀莱的关于化学亲和力的系统理论结合起来之后,拉普拉斯把数学上定义的分子力用于力学、热学、光学和化学,从而在统一的和自成系统的研究方法基础上建立了物理力学。不管这一理论取得了多么的成功和多么前途无量,随着1815年拿破仑政权的垮台,拉普拉斯和贝陀莱随着失宠,影响力很快减小,拉普拉斯的这一理论也开始受到打击和挑战。亲和力的理论遭到了J·道尔顿(John Dalton)的化学原子论的责难。道尔顿的原子论认为化学元素的原子都具有定量关系上的相对重量,化学元素并不是化学力的一种数学理论。热素说也开始受到冲击,把热素作为普遍存在的不可称量流体的学说受到了批判,并且提出用光的波动说取代光的微粒说,粒子光学曾是拉普拉斯的物理理论的核心。总而言之,拉普拉斯的物理学已经承受了种种打击。在强调采用定量的实验方法方面,在强调经过数学办法处理的统一的物理学(亦即在力学和其他物理现象之间建立起联系)方面,拉普拉斯所确立的物理学目标,尽管不能作为物理学的概念结构,但对19世纪统一的物理科学的创立却是至关重要的。采用数学处理办法和定量实验手段,运用统一的物理世界观,并且利用物理实在的模型公设去满足实验检测和数学公式的描述,这些观念的确立构筑了19世纪物理学发展的总体轮廓。

不可称量流体受到英国物理学的冲击

抛弃不可称量流体是促进19世纪早期物理学发展的最重要的原因之一。在英国,不可称量流体学说的批判发生在二元论盛行的时期,亦即不可称量的相互排斥的以太和普通物质的吸引力平衡理

论的盛行时期。在英国,随着皇家学会(1799年成立)对利用科学研究来改进科学仪器和促进实际应用所产生的兴趣的增长,对不可称量流体学说开展了三次很有影响的批判。本杰明·汤普孙,即伦福德伯爵(Benjamin Thompson,1753年—1814年)在1798年,否定把热作为不可称量流体的学说,他指出这个学说无法解释摩擦生热的现象。电池的发明以及1800年发现水的电解,使H·戴维(Humphry Davy,1778年—1829年)在化学亲和力的基础上阐明了电理论,抛弃了电流体的概念。托马斯·杨(Thomas Young,1773年—1829年)在1799至1804年写的一系列文章中,拥护光的波动说,抛弃了把光比作弹性流体的火的概念。

伦福德否定不可称量流体学说,但赞同这样的一种学说:热效应是由普通物质粒子的运动同背景以太的振动的相互作用产生的。通过普通物质和以太的二元论假设,伦福德断言:普通物质粒子周围的以太'大气'的振动可以传播给附近的以太,再进一步传递给普通物质的另一些粒子。伦福德的二元论又回到了传统的以太学说,但是他不认为以太是一种不可称量的流体;他强调指出,正是以太的振动,而不是弹性流体的流动才引起热的效应。

杨氏在他的早期的讨论以太作用模式的文章中,采用了普通物质粒子浸没在以太环境中的理论。他认为有一种普遍的以太物质,借此可以修正电流体学说。他证明:光、热、物体的附着力和排斥力都是以太所起的作用。虽然他放弃了在电以太基础上构筑统一的世界观的打算(这可能是因为他还不能很好地用这些术语解释附着力和排斥力),但是'发光的'以太就好比光和辐射热的运载工具,这观念已成为他的光学的核心内容。杨氏赞同'发光的'以太和光的波动说,因此他反对牛顿关于光'辐射'的理论,即反对牛顿的所谓一个个光微粒抛射的辐射理论,并且也反对光就像火那样的所谓以太弹性流体的学说。杨氏的光波干涉原理,源于他早先对声学研究形成的概念,他采用光波叠加的办法去解释光的衍射,假定

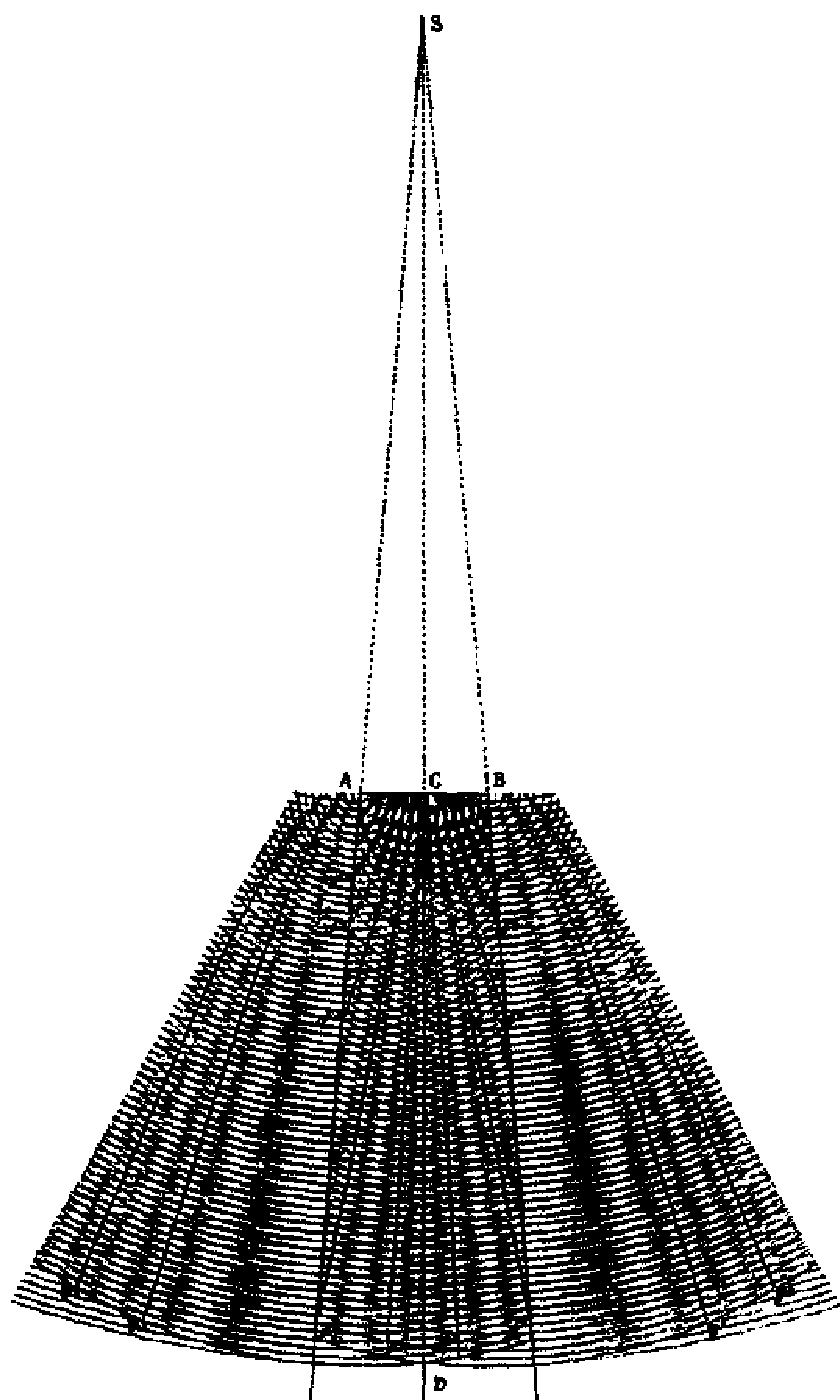
光波彼此交叠时既可能相互加强也可能相互抵消因而引起亮光带或暗光带。因而杨氏将统一的以太理论转变为他的光的波动说。

从戴维的早期论文中，可以看到他相信统一的以太学说，尽管他放弃了电流体的概念，但是以统一以太学说为本质的自然力统一的学说仍然是支配戴维物理理念的关键。他精心研究了化学力的电理论，坚持认为电力和化学力是密不可分的，而且认为电力和化学力实乃同一种力所为。

所谓不可称量流体的学说，在 19 世纪初，已受到越来越多的质疑。自然力互相平衡的概念，以及自然现象的统一和相互转化的概念，都是 19 世纪始终坚持，确实也对物理学的发展产生过重大影响的。当然，这些思想最终同不可称量流体的学说彻底决裂了。法拉第和焦耳在力平衡学说的基础上发展为自然能或自然力可以相互转化但不能毁灭的学说，这里的转化是概念的纽带，到了 1850 年左右，这一学说又被发展为能量守恒原理。

菲涅耳和弹性固体以太

A·J·菲涅耳(**Augustin Jean Fresnel**, 1788 年—1827 年)提出的光的波动说是最有影响力的，也是为使人们放弃不可称量流体学说而作出最大的贡献的。菲涅耳工作从一开始就针对不可称量流体的理论框架的，它冲着拉普拉斯的光的微粒说和热的热素说。早在 1814 年，他对光学刚发生兴趣的时候，菲涅耳就写道：“我猜想光和热都是同某种流体的振动联系在一起的。”在他的光学理论中，他把立足点建立在光是介质的一种运动表现形式的概念基础上。到了 1821 年，他采用波的传播媒介(即稀薄发光以太)的动力学术语，建立了光学这门学科。菲涅耳之所以否认光的微粒说，那是因为光的微粒说暗示着存在不可称量流体这种物质的反常形式；在他的理论中，光的现象是用以太的振动来加以解释的。抛弃了普通物


S
A
C
B
D

质和不可称量物质两种截然不同的物质观之后，菲涅耳考虑根据以太的力学特性来建立一种统一的物理学，他认为以太也是一种普通的物质形式。他抛弃了光的粒子"辐射"说，赞同光是发光以太中波动传播的学说。

1815年菲涅耳接触阿拉戈之后，对当时微粒光学的复杂性才有比较清醒的认识，但对杨氏的工作却了解不多，菲涅耳提出用干涉原理去解释光的衍射现象。菲涅耳采用实验的办法，发现衍射带的观测位置和理论预示的位置十分接近，以此将衍射带解释为由波的建设性干涉和破坏性干涉引起的结果。他的论光衍射的论文，呈送到巴黎科学院后，于1819年得了大奖，正是这篇文章奠定了光波干涉的数学理论的基础。虽然菲涅耳得到了奖励，而且在评奖过程中他的理论还得到了意想不到的实验验证，但是他的论文并没有使拉普拉斯学派明显地放弃光的微粒说而转向赞同光的波动说。

图 2.2　菲涅耳在1816年的第一篇关于光的衍射的论文中，讨论了衍射光带的成因。当一根发丝或其他细丝被一束窄光束照射时，可以看到屏上明暗相间的条纹，这就是菲涅耳所研究的光的衍射现象。他主张光是一种扰动，正是这种扰动的叠加和光波的干涉原理解释了这一衍射效应。扰射体(AB)反射的光波和从光源(S)来的直接光波同位相处，即出现互相加强的亮条纹。当来自光源和来自扰射体反射的光振动位相相反时，两束光互相抵消，就出现一条一条的暗条纹。

菲涅耳对光波干涉的理论处理所预示的衍射条纹的位置同实验得到的值十分接近，这里他演示了这一结果。他用光波的叠加和抵消来解释衍射条纹，有力地支持了光的波动说，当他从实验上证实他的理论判断时，波动说解释受到了强有力的支持。阿拉戈也表示支持光的波动说，他很好地报道了菲涅耳的工作，并希望作进一步深人的研究。毕奥则用微粒说来解释衍射现象以致作答，拉普拉斯的微粒光学的支持者们，还就这一课题提出了开展一场研究竞赛的提议，以便对衍射得到微粒说解释，并以此来拒绝光的波动说。菲涅耳的优秀论文于1819年呈交巴黎科学院，为光的波动说的胜利立下了汗马功劳。在对论文进行审读的时候，泊松指出，菲涅耳的理论能解释意料之外的结果：在用作衍射体的圆盘阴影的中心所出现的那个亮点，这个亮点实验上证明是确实存在的。[资料来源：*Oeuvres completes d'Augustin Fresnel*, ed. H. de Senarmot, E. Verdet, and L. Fresnel, 3 Vols. (Paris, 1866—70), 1:23]

1808 年,马吕斯发现反射光的偏振现象,这表明光具有反对称的性质,这就向菲涅耳理论提出了重大的挑战。正当马吕斯和毕奥用光微粒的反对称运动解释了光的偏振问题时,菲涅耳的关于波在流体以太中传播的概念还没有关于偏振效应反对称的丝毫含意。菲涅耳意识到,通过光波和声波的比较对提出光的干涉学说尽管起到了有益的作用,但若认为光波和声波相似那就不对了。如果光的波动说是正确的,那么以太的力学性质就值得进一步研究,为什么偏振光的反对称性与菲涅耳的假设不协调呢?菲涅耳认为光波也像声波一样,在介质中沿纵向振动,振动方向就是波传播的方向。为了解释偏振现象,杨氏[①]提出了一种所谓的"不完全解释",认为光波就像一根拉紧的绳子那样由"横向振动"所组成,即振动方向与波的传播方向互相垂直。

为了解释光的偏振现象,菲涅耳又提出了这样的假设:构成光的振动由两个彼此成直角的分量所组成,也就是沿纵向振动分量和沿横向振动分量两个分量的组合,假定偏振是由于纵向分量消失的结果。到了 1821 年,随着对偏振光性质的深入研究,他开始认识到构成光的振动只可能是横向的振动。他提出了一种关于以太的模型:以太是由在一定距离上受力束缚作用的分子所组成的介质,借助这种介质只有横向振动才能传播。在回答泊松关于横波不可能在流体介质中很好地传播的批评时,菲涅耳争辩道:解决问题的出路在于重建以太学说,而不是枉费心机地否定光的波动说。菲涅耳认识到,流体以太确实不能产生横向振动;为了产生横向振动,以太必须具备刚体的特性。菲涅耳原先并没有重视建立以太的力学模型,只是考虑他的光的波动说如何有利。菲涅耳的结论是:光波是横向振动的波,并提出了建立以太的力学模型的问题,用模型来

① *Miscellaneous works of the late Thomas Young*, ed. G. Peacock, 3 Vols. (London, 1855), 1: 383

说明以太只传播横波而不传播纵波,这也是反映 19 世纪光学的最主要特点的大问题。

菲涅耳的工作对 19 世纪物理学的发展是至关重要的,这也向我们提供了一个如何通过力学模型的建立达到统一理解物理现象的范例。模型的建立是物理学理论加工的中心环节。光学的定律以及其他相关的物理现象的定律都可以在力学解释的框架内完成,而且参照固体力学和连续介质力学,很容易理解这一点。

发光以太和力学解释

菲涅耳的工作开创了对以太物理性质的一系列研究工作,以至建立了光学原理的数学基础和以太的精确的力学结构。在 1830 年发表的论光学理论的一篇重要文章中,A·L·科希(Augustin Louis Cauchy,1789 年—1857 年)以以太具有弹性固体介质的力学性质为前提,对光学原理提出了一套完整的数学处理方法。科希的主要创新在于:从弹性固体的运动微分方程出发得出光作为横波的振动传播规律。科希的研究工作难就难在他无法证明关于弹性固态以太的分子结构是否正确,他也无法确定为了得到光学定律所提出的边界条件是否恰当。虽然科希的工作在数学手段上要比菲涅耳的高明得多,但是两者的问题却是相似的:科希的弹性固体以太的力学结构显然是有问题的,它与光学原理究竟有何关系也是模糊不清的。

科希的研究对英国的影响特别大,它促进了英国对光学的力学基础和以太结构的研究工作。包括 J·赫歇尔(John Herschel,1792 年—1871 年)、W·惠威尔(William Whewell,1794 年—1866 年)和 G·B·爱里(George Biddel Airy,1801 年—1892 年)等在内的新一代数学家和物理学家都在 1830 年代极力支持光的波动说,他们还把欧洲大陆的分析数学引入剑桥的数学教学之中。光的波动说,尤其是科希

精心倡导的形式，使光学定律可从弹性固体运动的微分方程推导出来，这就极其有利于使他们相信，应用数学方法也可以解决物理问题。不顾光的牛顿‘辐射’学说的支持者们如何反对（由于波动说的某些理论预测还没有完全得到实验的证实），波动说的支持者们强调波动说的数学根底，并主张发光以太才是光学理论的基本假设。

G·格林（George Green，1793 年—1841 年）① 在 1838 年发表的那篇重要的论文里，试图建立一种可靠的弹性固体以太理论的力学基础，他从表示以太力学性质的数学函数出发，导出解析形式的光学定律。格林批评了科希关于以太的分子结构假定，认为物理实在和用来描述物理实在所使用的模型是存在某种差别的，他也强调了要说明发光以太结构的困难所在。他断言：“与其假设某种根本上同自然界的机制差别极大的作用力模式，倒不如假设以一种普遍的‘物理原理’作为我们推理的基础。”格林的论文，采用分析动力学的办法，作为另一种特殊力学模型的结构，得出的解释具有特别的重要性。这种解释模式，由英国物理学家用术语‘动力学’理论来表述，并在 J·L·拉格朗日（Joseph Louis Lagrange，1736 年—1813 年）于 1788 年出版的《分析力学》一书所使用的分析动力学的形式基础上提出，这种理论同任何特定的物理模型无关。因此，它表明对现象作出力学解释是普遍适用的，也是正确可行的。

相应地，这也可以证明弹性固体以太的机械论是确实有效的，这项工作是由 J·麦克考拉夫（James MacCullagh，1809 年—1847 年）做的。1839 年麦克考拉夫写了一篇“论结晶体反射和折射的动力学”的文章，他试图采用拉格朗日的分析力学的方法来导出光学定律，以便建立光学原理同力学的联系。麦克考拉夫证明：以太的弹

① *Mathematical papers of the late George Green*, ed. N.M. Ferrers (Cambridge, 1871), p.245; *The Collected Works of James MacClullagh*, ed. J.H. Jellett and S. Haughton (Dublin, 1880), p.184

性模量并不是由以太的畸变和压缩所决定,而是取决于以太元素的转动位移,他从只同以太的转动弹性模量有关的解析函数出发,导出了光的传播定律。他强调指出,'发光介质的组成是完全不知道的',但他要求他的光的'动力学理论'是唯一适当的理论结构模式;麦克考拉夫承认他的转动弹性模量的证明(并没有涉及任何力学模型)'从力学的角度分析,不能被认为是充分的',麦克考拉夫的工作一直是有争议的,19世纪70年代麦克斯韦关于光的电磁理论出现之后,麦克考拉夫的旋转弹性以太的理论只在争论如何把转动作为以太力学的主要特性时才有重要影响。

G·G·斯托克斯(George Gabriel Stokes,1819年—1903年)在19世纪40年代发表的一系列论文,采用另一种方法继续讨论弹性固体以太的力学理论。考虑到并没有关于以太分子结构的猜测,因此也回避了科希工作中的明显困难,斯托克斯十分看好他的以太模型的物理结构。斯托克斯建立了一种类似于欧拉的流体力学理论的所谓理想连续固体的数学理论,在欧拉的方程中,连续流体的运动方程是在同流体的分子结构无关的情况下导出的。虽然斯托克斯假设以太粒子是有结构的,但他没有采用分子假设来解释光通过以太的传播。他指出:对于地球和行星穿过以太的运动而言,以太的行为就像流体;但对于组成光的振动而言,以太的作用又像是弹性固体。他把以太描述为类似胶水或果子冻之类的东西,亦即是一种含有少量胶质的混合物,当大物体平移运动穿过它时它的行为像流体,但是仍然具有弹性。因此当相应的光传过时它又会产生微小的横向振动。这样,斯托克斯采用了他的力学胶水模型,既描述了它的弹性,又回避了以太的分子结构理论。

菲涅耳首创的以太动力学的工作,对自然界的力学理论的发展有着特别重要的作用,而麦克考拉夫、格林和斯托克斯的理论,对物理现象的力学解释又提出了另一种不同的方法。斯托克斯的以太理论关系到对力学描述的解释问题,这和描述呼唤从普通经验出

发得出力学类比;而麦克考拉夫和格林则要求采用分析广义运动方程来说明力学解释。物理学家们并不认为这两种方法一定是相互矛盾的两种理论结构,有时甚至认为它们互相兼容甚至互相补充呢! 当然,要知道形象模型也有它的很多局限性,拉格朗日动力学方程的抽象性常常使人看不到它的客观实在性。建筑在物理模型和拉格朗日动力学理论基础上的力学解释的框架已成为英国物理学的鲜明特征,后来 W·汤姆孙和麦克斯韦正是将这一特征用来描述电磁学的。

傅里叶和数学物理方法

J·B·J·傅里叶(Jean Baptiste Joseph Fourier,1768 年—1830 年)在他的 1822 年出版的《热的分析理论》[①] 一书中,在根据数学原理创立统一的物理学方面作出了十分重大的贡献。傅里叶一方面关心热的数学理论,另一方面又把热作为不可称量流体,对所谓的热素说并不怎么反对;为了回避关于热的物理性质的所有问题,他认为普通物质粒子间都以其排斥力而彼此分开。傅里叶是从理性力学的传统开始研究热现象的,亦即把研究工作放在表征热传导的微分方程的基础上,而且这些微分方程还和所有物理假设没有关系。

从方法学上讲,傅里叶对热理论的处理方式完全类似于牛顿对引力数学的理论分析:引力的原因虽然是未知的,但是通过观测和数学分析可以发现引力的作用结果。傅里叶关于热的解析理论只是理性力学概念的推广。他回顾了从阿基米德、伽利略、牛顿到 18 世纪几何学所取得的辉煌成就的数学力学简史,注意到这一过程中的研究工作主要局限于研究力学、动力学和静力学问题,以及固、液两态物体的运动原理和平衡问题。这期间的力学理论并不适用于对热

---

① Fourier, *Analytical theory of heat*, trans. A. Freeman (reprint. ed, New York, 1955), p.7

效应的研究,因为热效应具有自身独特的一些现象。但是无论如何,用于研究物体力学性质的解析方程很可能适用于对更广泛现象的研究领域。傅里叶阐明:数学分析的广泛适用性就像自然界本身的多样性,数学语言的清晰性和普遍性可将一切现象归纳到数学定律中,这也表示了自然规律的一致性及和谐协调性。

在理性力学的框架内考虑热的数学理论,使傅里叶可以回避关于热本质的假设。正因为理性力学是建筑在可观测量的基础上的,傅里叶的数学是建筑在热效应的基础之上的,而不是建立在对热的假设原因上;也就是说是建筑在物体温度分布的基础上,而不是考虑由热的排斥力所决定的物质物理状态上。傅里叶证明:理论的基础原则可从'极少数的原始事实'出发,再通过数学分析,这种方法的分析过程很像理性力学。

傅里叶是从不同物体之间的热传导来着手关于热的研究工作的,很可能先是模仿毕奥关于金属棒热流的论文,再研究固体中的热流。并于 1807 年将自己的研究工作向法国研究院报告。1811 年,他又把自己的工作推广到无限大物体内热扩散的处理问题,傅里叶的研究论文,经过修订获得了由科学院设立的关于热扩散的竞赛奖(不顾拉格朗日对傅里叶的数学证明提过多大的反对意见)。傅里叶的工作风格也同盛行的拉普拉斯的理论结构格格不入,泊松一直对傅里叶的分析力学持异议,也主张拉普拉斯的物理力学。根据泊松的热理论,他采用热素流体的物理模型,辐射直达远处。傅里叶的数学方法则十分的不同,他的重点放在求解热扩散的微分方程上,而不是给热流以假设的物理模型。他把热传导的处理基础建筑在固体和液体的温度分布上,通过理论分析,证明热传导是分子间的一种热交换。物质两个分子之间的热传递正比于它们间的温度差,并且还是它们间距离的函数,这个函数的性质与物质的种类有关。热流通量同温度有关,并且假定在热传导过程中热量是守恒的。傅里叶得出的'连续性方程'(原先由欧拉根据流体力学导

出)，是一个同热流和温度梯度有关的微分方程。从形式上看，同泊松的结果没有两样，由于这一方程并不是建筑在物理模型的基础上，傅里叶对热的性质并没有给予分析。傅里叶的目的是将物理问题转变为数学分析的方程。理论的基础是温度的经验分布律，该定律则由实验给予检验。热传导方程则由温度分布的基本事实导出；不管热的性质如何，热传导都能通过这些微分方程而得到很好的描述。

傅里叶的热解析理论对后来的数学物理产生了重要的影响，他将理性力学的框架推广到包括热传导在内的各类问题，这也为数学物理提供了一个不限于很窄的力学问题内的范例。傅里叶的方法也强调数学定律的权威性，也注意到数学理论和它的物理解释是不同的。这种区别对 W·汤姆孙在 1842 年建立静电学理论中的影响是重大的，因为汤姆孙的静电学理论所用的数学形式同傅里叶的热解析理论中的热分布的数学理论十分相似，从热传导与静电吸引的对应关系上可以明显地看到这一点。汤姆孙提出的几何模型，对静电学和热传导都是适用的，根据这种模型，静电荷分布由电力线通量表示，热量分布则由热流通量表述。于是连续性方程也适用于电学理论，从热流通量的连续性方程或守恒律，可见电荷流也满足守恒律。现象之间的一致性由连续性方程所表示，这是数学的一致性而不是物理的一致性，这也是几何形式的统一，并不是热学和电学间的物理类似性。

傅里叶的工作突出地表明了数学形式的重要性，并且数学形式同物质组成的理论无关，说明数学表述和物理表述是两码事。尽管 19 世纪的物理学家并不回避物理模型，而且物理模型的建立又不同于物理客体的表述。正如格林在表述他的以太力学理论时所思索的那样，模型的假设和‘自然过程的机制’是有区别的。

电 以 太

发光以太理论为光通过周围介质的空间提供了一种如何传播的物理模型。1820 年丹麦物理学家 H·C·奥斯特(Hans Christian Oersted,1777 年—1851 年)发现了电磁学,这使人们千方百计要建立电力在电以太中传播的理论。普通物质周围粒子构成电"大气"的概念与 18 世纪物理学理论工作者在著述中所描绘的完全一致,但是,到了 18 世纪后期,电"大气"的概念已演变为"活性球"的概念,所谓"活性球"就是电力空间的换一种说法。很多电气理论工作者在探讨电在空间分布的物理基础时,把电的作用表述为以太介质所产生的应力。电和磁的关系问题,电流体、磁流体的联系问题都是人们经常讨论的问题,不过虽然人们认为电和磁有相似性,但认为它们两者又是各自独立的现象。

奥斯特发现电流对磁性指针的作用之后,电气科学逐步形成了,认识到电、磁现象是统一的。电磁学的发现使奥斯特的电学研究达到了顶峰,通过这一研究,他相信自然力的统一是有牢固基础的。他坚信这样的自然观:电学、磁学、热学和光学都是同一种力的不同表述而已,他试图用引力和斥力两者不平衡的术语来解释自然现象。这些都是 18 世纪后期物理学的共同理念,但奥斯特受到它们在德国自然哲学传统中的表现的影响,德国的自然哲学注重自然的一致性和力的极性。根据康德的理论,引力和斥力这样的基本力都属于物质的明确属性。奥斯特认为电流是一种动力学振荡,是相反方向的引力和斥力之间不平衡所产生的力的波动。他发现当磁针分别置于载流导线的上面或下面时,磁针的偏转方向是相反的,他猜想由于导线中的电力波动,引起导线周围的空间发生一种圆周运动。奥斯特的实验表明,电、磁力只沿圆周方向才有作用,电、磁力的分布也是一种立体分布。

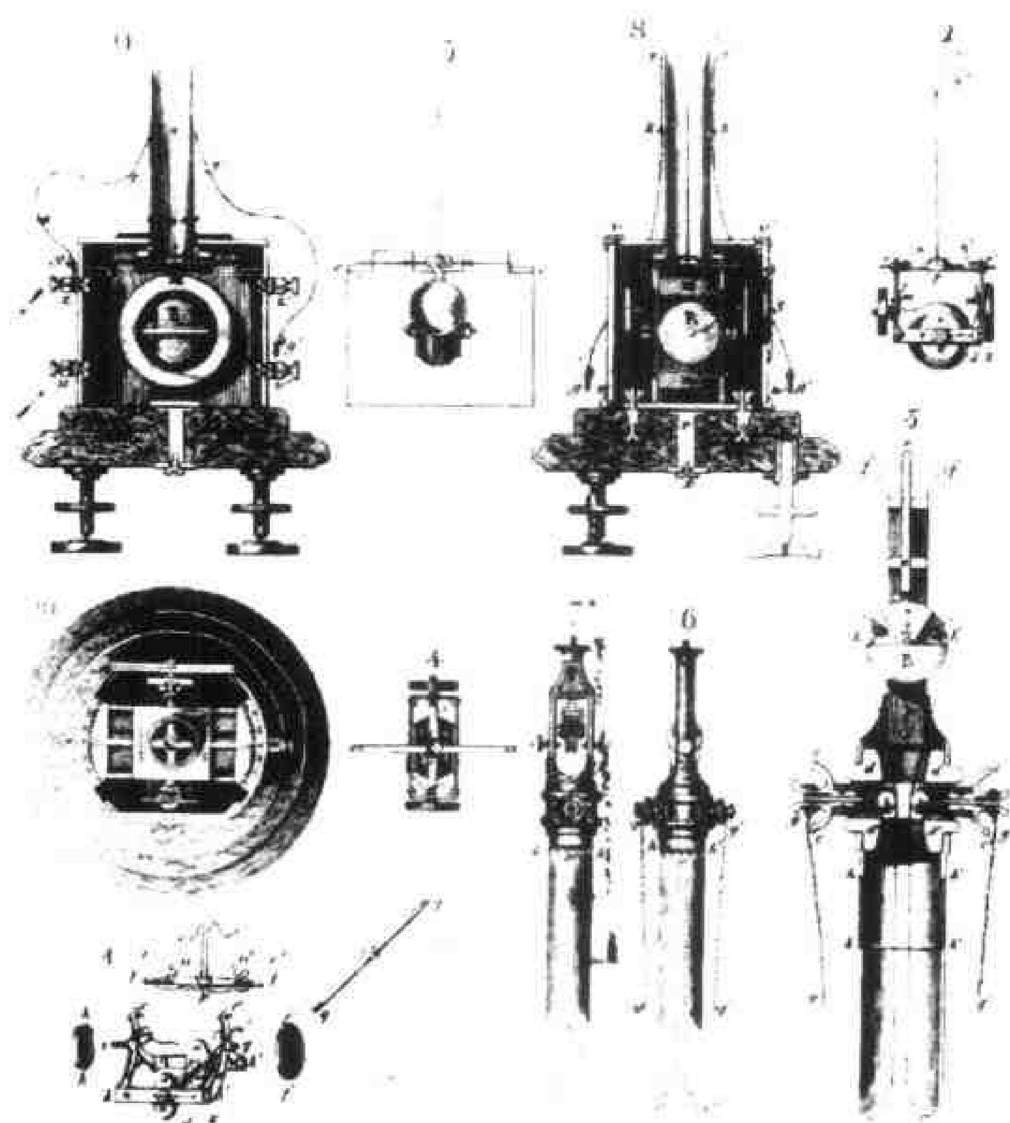


图 2.3 W·韦伯的‘电动式电表’(1848 年)。这是为准确测量电作用力而精心设计的仪表。其中由铜丝绕制的小线圈置于固定不动的大线圈之内,一旦电流同时从两个线圈中通过时,悬挂着的小线圈就发生转动。悬挂小线圈的支架能抑制小线圈的转动角度,并使转动角度正比于流过线圈电流的大小。从图中可以看到,仪表的结构十分精巧,线圈的转动十分灵活,即使很小的电流流过,线圈也会有所反映。这一仪表充分说明,物理学家和仪表制作者间的关系十分密切。物理学家韦伯所关心的是如何定量测量的问题,他强调指出,实验测量必须符合严格的标准,传统的定性分析的方法应当抛弃。

这一方法反映了 19 世纪早期德国物理学已出现专业分工的倾向,不但强调研究的价值,强调采用数学方法和准确的实验测量,而且强调开展创造性的实验室研

奥斯特的发现加速了多种多样假设的出现，以便用来解释电磁相互作用的空间分布。物理学家们用空间的磁曲面来描绘力的几何构型，也有人用周围以太中的磁流体旋涡来表示圆周形的磁力。A·M·安培（Andre Marie Ampere，1775年—1836年）提出了另一种不同形式的假设：用光波传播的类比去解释电磁作用的传播。安培把奥斯特的结果推广到说明载流导线之间的相互作用，证明用电流可以解释磁学，并能根据无限小电流元之间的吸引力和排斥力的关系，建立电磁学的数学理论。安培引入菲涅耳的发光以太概念来解释电磁作用的传播。他指出，以太是由正负两种电流体组成的，电磁学现象是由电流体的扰动引起的，光则是流体振荡所产生的结果。发光并布满空间的以太是电磁作用传播唯一一种物理学模型，大约到了19世纪20年代，由以太传播光的思想和即时电磁作用的概念都已经确立了。

奥斯特的研究又促进了对其他电磁效应的研究工作，正是这些研究才导致M·法拉第（Michael Faraday，1791年—1867年）于1831年发现了电磁感应现象。法拉第发现[①]当电流通过绕在铁环一边的导线（初级线路）时，会在绕在铁环另一边的导线（次级线路）中产生瞬时电流。为了解释当初级线路闭合时，次级线路中的感应瞬时电流，法拉第指出：这种效应是由“电波”的传播造成的。他证明

图2.3（续）

究和实验数学研究。这些观念促进了19世纪德国物理学的发展并对德国研究工作极为重要。德国的物理学研究已成为当时的研究和专业分工的典范，国家大学研究基金给物理研究以资助，并直接分配给各大学的教职人员，促成了物理学的专业化。［资料来源：Wilhelm Weber，'Elektrodynamische Maassbest-immungen'，*Annalen der physik* 73（1848），336］

---

① *Faraday's diary, being the various philosophical notes of experimental investigation made by Michael Faraday*, ed. T. Martin, 7 Vols.（London, 1932—36），1：369

电和磁的作用都是即时传递的，而且还认为这种传递是由向前的运动造成的。他将磁力扩散同光和声波在周围介质中的传播进行了比较。法拉第除了熟悉奥斯特和安培关于电磁力传递的想法外，很可能还了解以太介质的作用很像电作用载体的早期理论。这些关于电力空间分布的理论提出了这样的思想构架：根据这种构想来解释他所发现的电磁感应，也就是他后来重视电磁力的空间分布并精心建立他的电磁场理论的关键所在。

转化过程和自然界的统一性

相信自然力互相转化和自然界的统一性，是建立热、光、电、化学之间的相互关系和相互联系的基础，这也是 18 世纪后期物理学的共同观念，而且也是后来对各种不可称量流体进行有别于普通物质的排斥性的材料物质进行修正的理论基础。19 世纪 30 年代自然界统一的认识达到了至关重要的程度。继戴维探讨了化学力和电力间的关系之后，奥斯特发现了电磁学、法拉第发现了电磁感应，以及 M·梅隆尼(Macedonio Melloni，1798 年—1854 年)确立的光和辐射性的相似性，对于确立不同的自然现象的等价性来说，这些转化过程的涵义是十分深刻而重要的。到了 1850 年左右，随着能量守恒定律的建立，自然力的统一性和互相转化性已形成了相当清晰的思路。奥斯特、法拉第和梅隆尼在 19 世纪 20 年代和 30 年代的实验发现，除了他们自己之外，的确并没有使物理学家懂得自然界的统一性和自然力的转化性。经过很长时间之后，这一学说才被人们所了解。直到放弃了不可称量流体的学说之后，物理学家才承认自然现象的统一性和转化性。放弃不可称量流体学说，并得到新的关于转化现象的实验发现的支持，自然力统一性和等价性学说于 19 世纪 30 年代方使人们逐渐深刻地认识到自然现象间的这种关系。

发光以太概念的发展也为讨论自然界统一性提供了新的契机。菲涅耳已经看到,通过对普通以太的修正有可能解释光、热和电的关系;安培则提出了一种所谓电以太的概念:以太是电磁作用和光学作用的共同载体。早在19世纪30年代,安培提出了一种相当深刻的关于光、热比较的理论。他认为,热并不是由不可称量流体的运动产生的,而是由物体分子的振动引起的,振动分子并不是直接把自身的运动传播出去,而是通过以太这一中介才发生传播的。因此热是通过以太的振动来实现传播的。安培关于热的"波动学说"受到了高度的重视。从热、光、电本质上一致的判断使人们看到了一种崭新的机会:以太动力学,亦即用以太的运动来说明这些现象的原因。正是以太的动力学行为,而不是不可称量流体的行为,才是统一物理学的基础。

把研究重点放在自然功或自然"力"的统一性和互相转化性上是法拉第实验研究的重点和主要方向。他在19世纪30年代所做的电化学实验,就是专门为了解释化学和电学之间的关系的,他坚信化学亲和力和电力是一致的。他注意到由于热、电和化学亲和力在本质上是统一的,因此又是可以互相转化的。根据他的看法,自然力之所以能互相转化,完全是由它们的不可毁灭性造成的:自然力不可能从无到有地创造,只能从一种消耗到另一种产生。法拉第[①]的大量研究工作都围绕转化现象:电磁感应、电化学、以及光的磁性作用。他还想判断电学和引力之间转化的可能性,通过实验极力揭露它们之间的联系。在法拉第的物理学中,自然力转化的思想是从不可称量流体学说中滋长起来的。他在1845年发表的论磁学对光的作用一文中明确指出:相信'力'的统一性和等价性是他最基本的信念,他相信表示物质各种形式的力必有一个共同的起因,

① Faraday, *Experimental researches in electricity*, 3 Vols(London, 1939—55, reprint ed., New York, 1965), 3:1—2

换言之，这种种形式之间不但关系密切，而且互相依存，使得它们只能如实在的那样可以互相转化，从一种形式转变为另一种形式，并且当它们发生转化作用时，力还具有等价性。

力转化的概念是法拉第物理世界观的核心，这种观念使他很易理解自己的发现，也使他的实验研究的目标非常明确。法拉第的学说由 W·R·格罗夫(William Robert Grove，1811 年—1896 年)于 1846 年在“物理力的关联”一文中作了通俗性的介绍，他的解说后来被反复作为能量守恒原理的一种表述。根据自然力或功的不可毁灭性和可转换性，格罗夫企图说明转化现象的深刻意义，到了 19 世纪 40 年代，这些思想已成为物理理论的重要组成部分。

自然界的统一性：热和机械功

机械功和热相互转化和等价性的表述是建立能量守恒原理的关键所在。在证明力学过程中机械能的损失正好等于所产生的热量时，能量守恒原理断言自然现象是统一的。18 世纪的物理学家是在力学体系与非力学过程分离的限制下考虑能量损失的，因此他们并没有搞清楚热量和机械功等价的理论。不过机械能守恒的概念是从 18 世纪的力学论著中发现的。人们都很清楚，莱布尼兹最先说明的是活力守恒原理的形式问题。莱布尼兹证明，用质量和速度平方来计量的活力(动能)在力学过程中是守恒的。因此，宇宙的活力也是守恒的，自然界并不像时钟那样需要上发条。

18 世纪物理学家所使用的活力守恒概念也不一定要服从莱布尼兹的自然理论。随着活力守恒原理的应用越来越广泛，尤其是在讨论理想弹性体的碰撞时的应用。J·伯努利在 18 世纪 20 年代和 30 年代发表的论文中，对活力的概念作了最系统、最透彻的表述。他和莱布尼兹都认识到，在非弹性碰撞过程中，活力很可能会有不少的损耗。J·伯努利指出，非弹性体很像是压缩以后弹不回去的弹

簧。因此,在压缩物体时,很可能要消耗一些活力,但在物体变形过程中活力决没有破灭。虽然 D·伯努利后来在讨论热机的工作时(热机是利用储存在煤炭中的活力来使气体运作的),并没有提出热功等当性,也就是说他并没有把非弹性碰撞过程中活力的机械损失归因于热,他只是在严格的力学范畴内判断发生这类损耗。卡文迪许(Cavendish)在 1760 年左右写的文章中,将活力守恒原理应用到热交换的情况:假定热是由物体粒子的振动引起的,热的传递遵循物体粒子的活力守恒原理。尽管他也同 J·伯努利一样,认为非弹性碰撞过程中活力不可能毁灭,但卡文迪许并没有把活力损耗同热的产生等同起来。他认为力学系统和热学系统虽有相似之处,但毕竟属于不同的两种系统。

到了 19 世纪早期,在关于动力学技术的著作中,活力已用机械"功"给予计算,它是力与距离的乘积(也可称为"机械功"或"机械效应")。燃烧煤作功的热机的工作,表明功和热是可以转化的,P·厄瓦耳(Peter Ewart,1767 年—1842 年)建立[①]了燃煤产生的热量和可利用的'机械功'或'机械力'之间的定量关系。到了 19 世纪 20 年代,在力学的理论性论著中已突出了"功"的概念,并把功定义为由力对位移的积分,阐明了功同活力概念间的数量关系,说明功为机械"能"提供了一种测量的量度。作为量度机械能的功,为转化过程确立了一种定量的依据。

到了 19 世纪 40 年代,不少物理学家和工程师已经清楚地建立了机械功和热的定量等当量关系,他们算出了热转变为功的转化系数,亦即算出了热的"机械等当值"或"机械值"。机械功概念的明确表述以及热功定量等当量的定量计算,对于能量守恒原理的表述、实验验证和数学描述都是重要的因素。热功等当性的论断,明

---

① P. Ewart, *Memoirs of the Machester Literary and Philosophical Society* 2(1813),144,169; G. Coriolis, *Du calcul de l'effet des machines* (Paris, 1829), p. iv

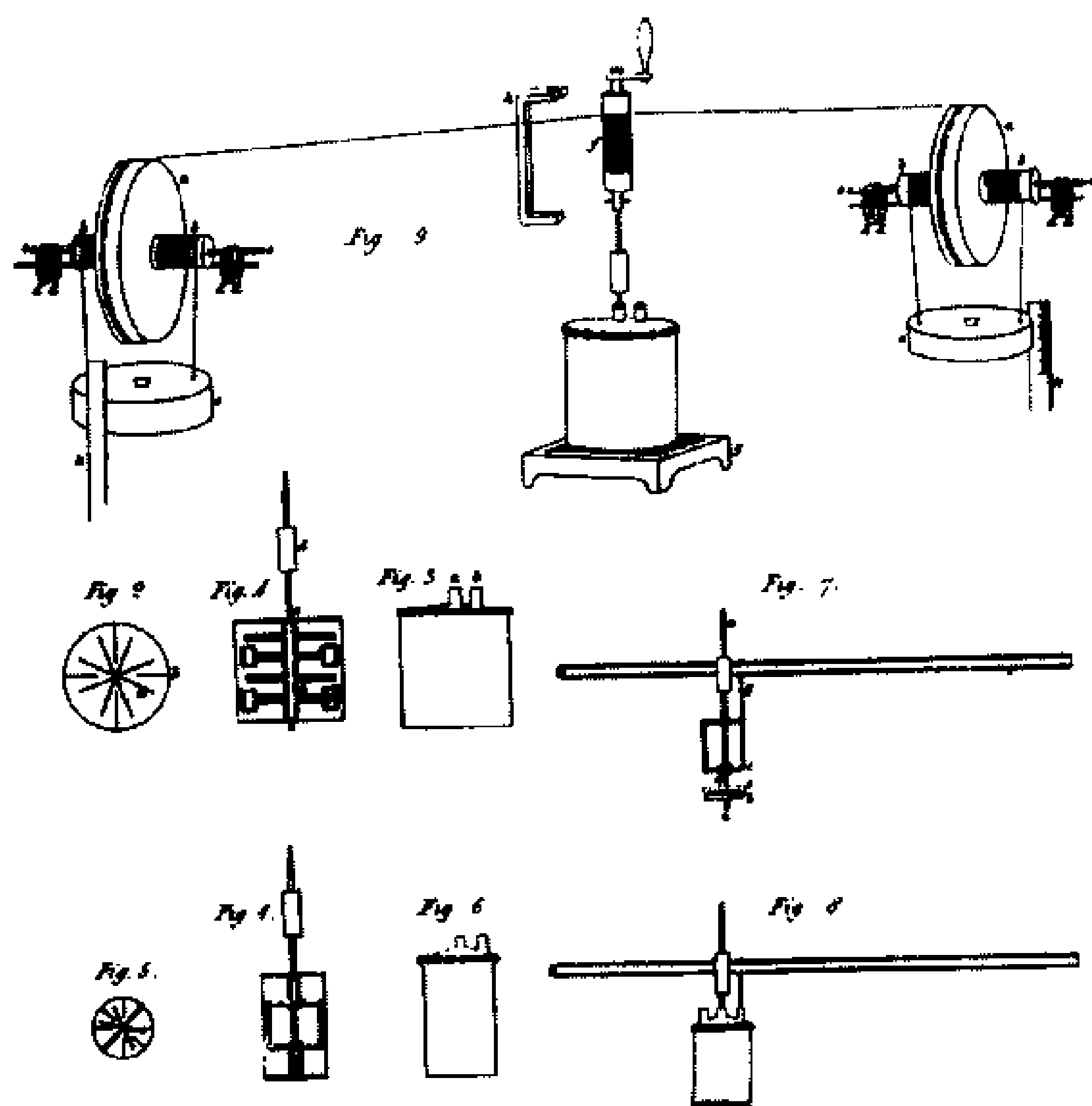


图 2.4 J·P·焦耳的叶轮装置:他利用这一装置建立了热功等当量关系(1850 年)。19 世纪 40 年代,焦耳在皇家学会刊物上发表的关于热功关系的论文,标志着这项研究的顶峰,他利用流体的粘滞性,将浸在流体中的叶轮转动起来从而产生热量并使流体的温度上升,他用这种设施测出了准确的热功当量关系。小图 1,小图 2 为铜质叶轮的水平和垂直方向的剖面图,说明转动轴及其叶轮的固定办法,以便流体保持稳定。小图 3 表示盛满水的铜质容器,容器大小与叶轮匹配,容器顶端另有一小孔,可以插入温度计以便测量水温 小图 9 为整个装置的运作情况,其中叶轮的转动由两个重锤的下降引起。小图 4,5,6 为改进后的装置,这是铁质叶轮和铸铁容器,容器中盛放的液体是水银而不是水。小图 7,8 用于演示固体摩擦生热的装置。焦耳从重锤下降的高度和液体上升的温度的测量中,得到了功和产生的热之间的数量关系,他的实验十分精细,以致热传导和热辐射的影响都考虑到了,温度计的读数可准确到百分之一到百分之二华氏度。

确地把力学过程也纳入到物理学家所讨论的转化过程的网络之中。能量守恒定律提出了这样一种概念上的解释框架：自然力互相转化是一条普遍的原理，并且转化过程中物理量守恒是可以定量计量的。建立能量守恒的同时，也阐明了热的机械论，亦即热是由物体粒子振动产生的理论。热的机械论为热和机械功的相互转化和彼此等当量奠定了基础。运动着的物质的机械本体论是自然转化和能量守恒得以解释的基础。

J·P·焦耳（1818年—1889年）在19世纪40年代的工作，对于描绘转化过程的网络联系和提供关于热和机械功定量等当关系的实验验证来说都是至关重要的。焦耳关于热的机械论表述在能量守恒原理和力学解释方法之间建立了紧密的联系。19世纪40年代初，焦耳的研究工作，重点是改进电机和从事电化学（由法拉第在强调化学反应的电学基础时所勾画的）问题。戴维和法拉第已经为化学亲和力找到了一种系统的电理论，焦耳希望更深入地研究这种电理论，以便通过对电、化学和热现象互相转化和定量等当量关系的演示去统一这些现象。通过测量热和机械功之间转化的定量关系，焦耳建造了一种将机械功转变为电流的电机，而电流又会产生出热量，这种机械装置还可用来计算热和机械功之间互相转化的数值关系。焦耳很快得到结论：通过摩擦，机械功可以直接转变为热，他坚持认为：无论何处，只要有机械力（功）的消耗，常常就可以

图 2.4（续）

焦耳得到的结论是：一是摩擦所产生的热量正比于所消耗的功；二是一磅水温度上升华氏一度需要消耗的机械功等于772磅重物下降一英尺的机械功；第三，功转变为热的过程中机械零部件的摩擦损耗可以忽略不计。皇家学会的论文审查人（可能是法拉第）提议禁止这篇文章发表。审稿者指出，焦耳得到的热量来源于机械功的消耗的结论，并不意味着功和热可以变来变去。[资料来源：James Prescott Joule, 'On the mechanical equivalent of heat', *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 140(1850), 64]

得到确切等当量的热量，他的这一说法既表示自然力是不可毁灭的，又表示机械功是自给自足的，只有上帝才有毁灭自然的功能。

确定了热的“机械值”等于提出了转化过程的定量计量办法。根据焦耳的看法，从热和机械功的关系可见，热的理论就是一种说明热运动模式的理论。从焦耳关于电的性质的理论出发有利于他推测出热的性质的理论。他指出，原子周围的电大气的转动速度可能由温度决定，他从精心建立化学亲和力的电理论出发去解释构成热运动的性质。不过焦耳理论的核心并不在强调热转化为机械功的中介作用是电的作用，通过摩擦证明机械功可以直接转变为热，他用实验方法测量由摩擦产生的热量的机械值，结论是一切自然力都可以互相转化、不生不灭、定量等价。机械功的互相转移，而不是热和功在互相转化过程中电的中介作用，才是焦耳自然理论的主体概念。到了 1847 年，他设计了一个说明机械功和热直接转化的草图：细长绳子下端挂一重物，绳子拖动惰轮转动，因此随着重物的上升或下降，相应的温度则会下降或上升。焦耳并未公开他的运动生热的设计图，只说明热量可由活力来量度，因此较热物体的粒子总是运动着的。

焦耳确立的热功转换的普遍物理学理论，在自然力的统一性和互换性的学说框架内引入了热的机械等价性的概念。焦耳断言，正是依靠“力”的转化措施，才使宇宙保持着有序状态，并且力的不可毁灭性表明自然界是自给自足的。一旦上帝确立了自然力的框架，这些自然力在总体效果上就保持不变了。焦耳并没有做过从不同自然力间的联系有关的理论假设出发的研究工作，他把自然力的可转化性和不可毁灭性的观念作为对他的实验发现进行理论解释的支柱。虽然这个理论并没有直接左右他的研究工作，但为他的关于转化现象的实验表演奠定了设想的基础。焦耳坚持认为他确立了热和功的互相转化性，但没有说明他建立了“能量”守恒的普遍原理。正如他在 1848 年对 W·汤姆孙所说的那样，他已经找到了“热

转化为机械功的证据”。因此焦耳断言,‘热量转变为机械效应(功)的可能性’是存在的,他相信这是蒸汽机理论的基础学说。热的机械论(热是由物质粒子的运动产生的)学说,有利于从物理上理解热和功的定量等当关系和相互转化关系。

亥姆霍兹和能量守恒

H·冯·亥姆霍兹(Herman von Helmholtz,1827年—1894年)在1847年写过一篇题为“论力的守恒”的专题文章,提出了一个表示能量守恒的数学公式。当然,亥姆霍兹所谓的“力守恒”,从概念上来看,还是很模糊的。说自然动力或自然力不可毁灭但可以互相转化,又说能量是守恒的。在能量守恒的前提下他对自然动力的转化进行分类,根据这种方法,再从数学上给守恒量一个准确的名称。

亥姆霍兹之所以对能量的理论发生兴趣,源自于生理学,因为他对动物的热能情有独钟。亥姆霍兹是柏林学派的生理学家中的顶尖人物,他们希望根据物理学的原理来建立基础生理学。亥姆霍兹试图从食物的氧化出发,来说明动物肌肉运动所产生的体热。J·冯·李比希(Justus von Liebig,1803年—1837年)试图从物理学定律和化学定律出发来研究生理学现象,亥姆霍兹受李比希的影响很大。尽管实验证据模棱两可,亥姆霍兹认为李比希的理论还是有道理的;呼吸是动物产生热量的唯一原因,他指出,李比希的判断完全取决于“恒力原理”——力的不可毁灭性和可转化性原理——的适用性。亥姆霍兹要求自己完成这样的任务:证明自然动力或自然力可以互相转化但不能毁灭的原理是正确的。

虽然他反对有机体具备的力不同于物理王国中的动力,只适用于活体的看法,但他通过对无机自然界中的动力的修正使之适用于有机生命体,以致很好地把李比希的方法引入到生理学中来。亥姆霍兹并没有抛弃李比希所用的活力的概念。对于亥姆霍兹来说,最

关键的问题是如何根据无机体的力定律来解释支配有机体的生理活动的力。他坚持认为，这种解释要求所有力的作用都遵循力恒量的定律。由于活力也不能无中产生，而且活力也会产生等量的另外一种力，因此李比希的活力的确同无机力具有同样的特征，亥姆霍兹认为李比希的理论取决于力恒量假设。不过亥姆霍兹对活力原理的确也有一点异议，即活力可以是自生不灭的，因此也不必受到力恒量原理的限制。

永动的否定是亥姆霍兹服从恒力原理的关键所在。他的论文主干是通过对守恒物理量的数学研究，阐明力守恒的原理。在研究过程中发现，力守恒或力恒量的概念还需要加上自然功的不灭性和可转化性这一层意思，即能量守恒。因此，亥姆霍兹的用法中包含着力守恒的思想(正如法拉第和焦耳所用到的)和能量守恒的确切数学定律——对守恒量作出更加准确描述的定律，这也是19世纪50年代能量概念成为主流时亥姆霍兹所研究的重点。亥姆霍兹试图根据物质和力的本体论以及材料物体和运动物体的机械本体论的解释框架来说明能量守恒。因此亥姆霍兹在论文中是根据第三义——指牛顿的吸引和排斥的中心力——来使用术语“力”的；他坚持认为物理科学的问题就是将自然现象归纳到不可替代的吸引力和排斥力，力的大小依赖于距离。因此，他对能量守恒原理的系统研究工作是同他的假设——自然界普遍适用于机械论——联系在一起的，他明确地指出，‘机械论是自然界被完全了解的条件’。

要使自然界被人们所理解，就要求自然界受到因果律的制约，这些因果律其实就是牛顿的中心力定律，为了使他的这些论点有说服力，亥姆霍兹求助于康德的自然界的形而上学。康德用吸引力和排斥力的术语来讨论物质，只是为了探索建立牛顿物理学运动定律及万有引力概念的可能性。亥姆霍兹声明，他对与物质有关的吸引力和排斥力的讨论是要说明自然界实际上就是遵循牛顿的中心力定律的，中心力定律是‘理解自然界的必要的概念形式’。通过康

德论点的支持，亥姆霍兹承认，他的只有牛顿中心力定律才能对自然界作出唯一可能的解释的主张不可能从经验上得以建立，而是需要独立的证明。他之所以同形而上学论点扯上关系，旨在证明他的主张和中心力定律的物理真实性是正确的。

对于一个受到来自固定力心的中心力作用的物体的运动而言，活力的改变由他所谓的'张力'这个量的改变来量度，通过这样的论证过程，亥姆霍兹得到了活力守恒原理的一个普遍形式。张力就是中心力的强度与物体到力心距离的乘积。亥姆霍兹所宣称的表示活力和张力之和为恒量的力守恒原理，取决于物体的运动由中心力定律所制约的假设。

亥姆霍兹的术语'活力'和'张力'相当于'动能'和'势能'，他的'力守恒'原理给能量守恒提供了一种数学表述。亥姆霍兹在他的数学论证过程中仔细地区别了术语'力'的双关语应用，在谈到活力和张力的能量时，'力'指牛顿的中心吸引力和中心排斥力；后来很快就指出，'活力'和'张力'就是19世纪50年代引进的术语'能量'的同义词。

亥姆霍兹把他的守恒原理应用到各种物理现象之中。讨论了非弹性碰撞过程中活力明显损失的情况，他证明不仅在非弹性体发生变形时（正如伯努利所指出的）才有活力的损耗，亥姆霍兹解释说，变形是导致张力增加的过程，而且活力损耗还伴随着产生热量。这是以前讨论的非弹性碰撞的一大进步，机械能的'损失'，可以用机械能转变为热能来加以解释。吸收焦耳早先文章的经验，亥姆霍兹继续把守恒原理应用到热学和电学的现象中。他反对热素说，同意按照安培的理论——热量借助波动的方式传播——来解释热传导。根据亥姆霍兹的理论，热量用物质运动的术语加以解释，热学过程与机械过程显然是密切相关的，这是在服从能量转化定律、遵循自然机械论的前提下，转化过程链条中的一个重要环节。亥姆霍兹关于能量守恒的研究工作的重要性，不仅在于提出了能量

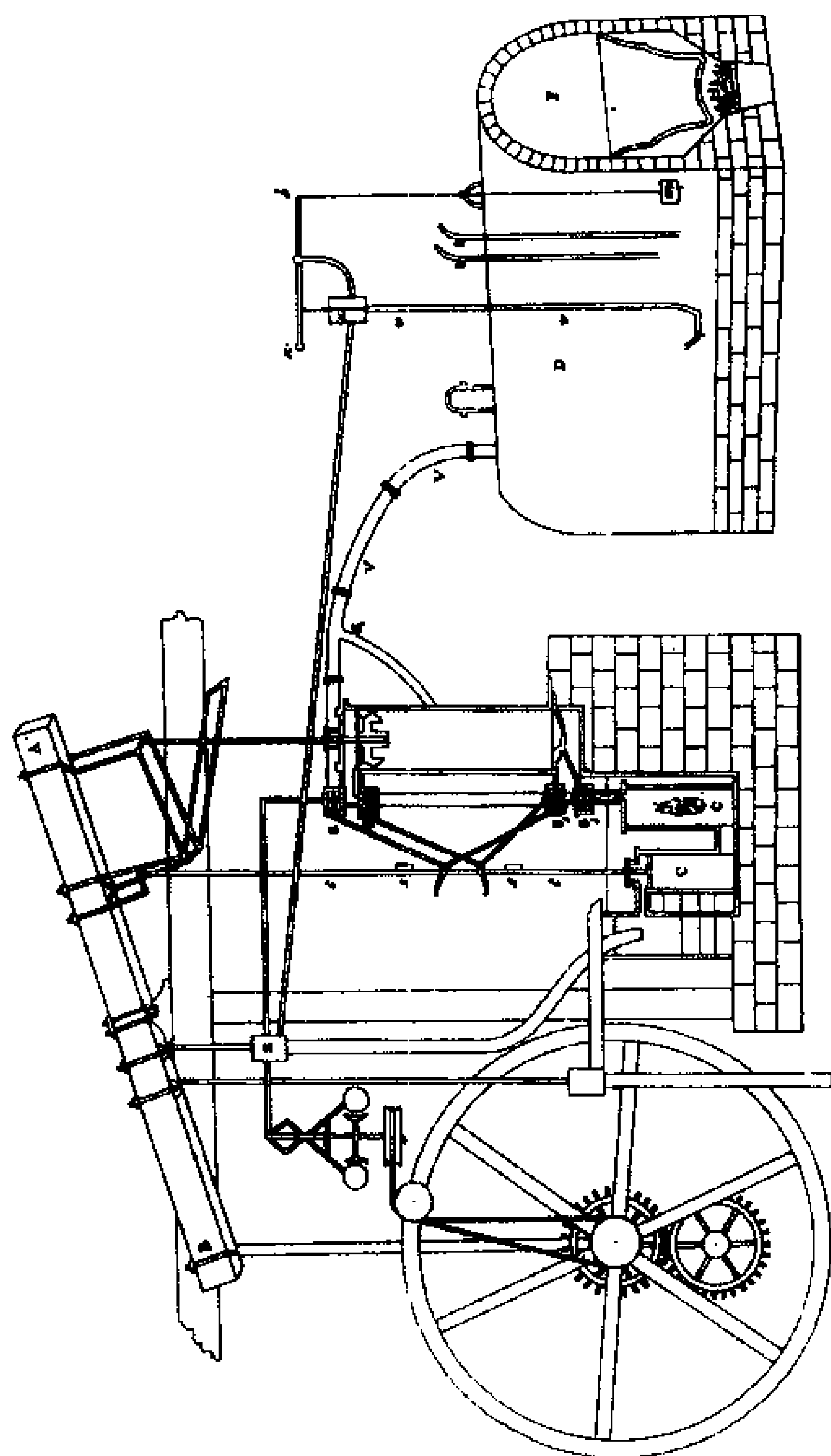
原理的数学公式,而且还在于强调了能量概念——与运动物质的本体论和力学解释纲领有关——的统一功能。

第三章
能量物理学和力学解释

1847年6月，W·汤姆孙，后来又叫开尔文勋爵（Lord Kelvin，1824年—1907年），在不列颠科学进步联合会召开的牛津会议上遇到了焦耳。这次偶然的见面，导致汤姆孙便开始研究起焦耳关于热量和机械功互相转化的文章来了。焦耳在牛津会议上宣读了这样一篇论文：重物下降牵动惰轮旋转并使液体温度上升。他宣布已经测出了惰轮产生的热量和产生该热量所需要的机械功之间的当量关系。汤姆孙发现焦耳的结论是很难理解的，他把焦耳的工作告诉他哥哥J·汤姆孙（James Thomson，1822年—1892年）。J·汤姆孙对焦耳的看法'感到心中无数'。汤姆孙兄弟俩对从S·卡诺（1796年—1832年）的工作得到的结论（热机作功过程中热量保持不变）产生了怀疑。卡诺的理论看来同焦耳的作功必须消耗热量的看法是相悖的。正是为了解决卡诺理论和焦耳理论之间的明显差别，才使W·汤姆孙于1854年建立了所谓的'热力学'（热的力学作用的理论）科学。

卡诺和热的动力

S·卡诺于1824年发表的“论火的动力学思考”一文，这正好是



在法国工程师和物理学家们广泛关注动力技术和蒸汽机的时候写成的。虽然卡诺原来的问题和他的论证方法的有些方面难免带有当时动力工程师的烙印，但是他打算对热机原理进行普遍分析所用的理论模型却属于他父亲 L·卡诺（Lazare Carnot，1753 年—1823 年）的所谓机器理论。L·卡诺打算通过机器最大效率的分析来建立一种普遍的理论，S·卡诺认为热机也需要一种相似的理论，这种理论应该与机器的普遍理论相似，不但适用于蒸汽机而且还适用于一切工作物质的各类热机。

卡诺是在采用热素说的前提下研究他的论据的，他假定热机在作功过程中热量是保持不变的。他观测到蒸汽机工作最根本的特点是：只有蒸气并不能作功，还必须有温度差机器才能动作。机器运转过程中并不消耗热量：炉子给锅炉供热使蒸气在汽缸里膨胀，

图 3.1　J·瓦特（James Watt）设计的蒸汽机的草图。本图系根据毕奥的物理学论文中的图重画而成。S·卡诺的热机理论在当时的影响与其说是为了更有效地作功，倒不如说给当时物理学带来的益处。卡诺强调了瓦特的创新精神的重要意义。蒸汽机在法国引起了广泛的兴趣，当时有许多法国物理学家都在讨论有关的理论，其中包括毕奥在他的重要的教科书中就作了讨论。卡诺指出，蒸汽机对社会、技术和科学等很多方面都有重要意义，他提出的论文对蒸汽机的理论研究和技术改进都产生了深远的影响。

法国对蒸气动力的重要性认识迟钝。但对 A·胡夫（Arthur Woolf）的双缸高压引擎（毕奥曾作过简单的研究）却相当重视。正如卡诺所指出的那样，这些研究工作对燃料经济学的重要进步（因为法国优质煤短缺，因此这一点特别重要）帮助很大。卡诺对理想热机的循环过程的理论解释，对当时讨论高压引擎十分有利。瓦特提出，由于蒸气的持续膨胀作用，即使蒸气切断之后，蒸汽机的膨胀冲程照样可以进行。尽管瓦特并没有就他的"膨胀原理"作细致的应用研究工作，但在 1815 年之后，他的这一工作，对法国高压引擎的应用研究的确发挥了极为重要的作用，卡诺以及很多物理学家、工程技术人员都研究过这一问题。正是瓦特的膨胀原理，使卡诺在循环中采用了绝热膨胀的过程，紧接着是等温膨胀，这两种过程构成理想热机的完整的"卡诺循环"。[资料来源：*Biot*，*Traite de physique*，4：pl. VI，fig. 73]

而当蒸气进入冷凝器时相等的热量被吸收了。蒸气的作用只是把热量从锅炉传送到冷凝器而已。热机作功最重要的因素是机器的温度差,他设想热'动力'是由热量流动引起的。他把水轮机中的水流同热机中的热流作比较,这种流体力学的比较使他想起了他父亲的工作和其他讨论过由水力驱动的机器运转的工程师的工作。卡诺指出,正如水轮机运作中水量守恒一样,热机运作中热量也是守恒的。热的动力只是热机温度差的函数,与热机工作物质无关,只要热机在连续的膨胀和压缩过程中温度可以随之改变的任何物质都可以用作工作物质。

卡诺在建立热机的普遍理论时,他把由汽缸和活塞、工作物质(大气)和保持不同温度的两个热库组成的理想热机的工作描述为一个工作循环,热动力就由两个热库间的热流所产生。在循环过程中,气体相继被压缩和膨胀,每一次循环总会发生热量从高温热库向低温热库的流动并产生机械功。'卡诺循环'是可逆的:假定输入先前产生的等量机械功,热机就会把等量的热量从低温热库返回高温热库。

卡诺对构成卡诺循环过程中的每一步的描述,同 E·克拉珀龙(Emile Clapeyron,1799年—1864年)在1834年发表的文章中所说的差别很大。克拉珀龙对卡诺论证作了数学上的修正,从而引起物理学家和工程师对卡诺循环的关注。他把卡诺循环用压强-体积图(这种形式很快成为教科书中的常用形式)来表示,他用数学方程来表述卡诺原理——作功只取决于热机的温度差。克拉珀龙还简化了卡诺循环中膨胀和压缩的步骤。在克拉珀龙(而不是在卡诺)的文章中,在循环结束时,机器和气体都回到了它们的初态,热量很明显是守恒的。虽然卡诺自己后来放弃了热素说,正是克拉珀龙的文章,阐明了(明显取决于热量守恒)的卡诺循环,才使汤姆孙和克劳修斯发现了卡诺思想的本意。此外,卡诺得出气体在相同温度差的情况下低温气体对外作功的量要比高温气体作功的量要大,他

对气体热性质的讨论就是用热素'下降'的术语来表述的。卡诺的说法有利于气体和热量的热素说,因此巩固了热素说的地位。

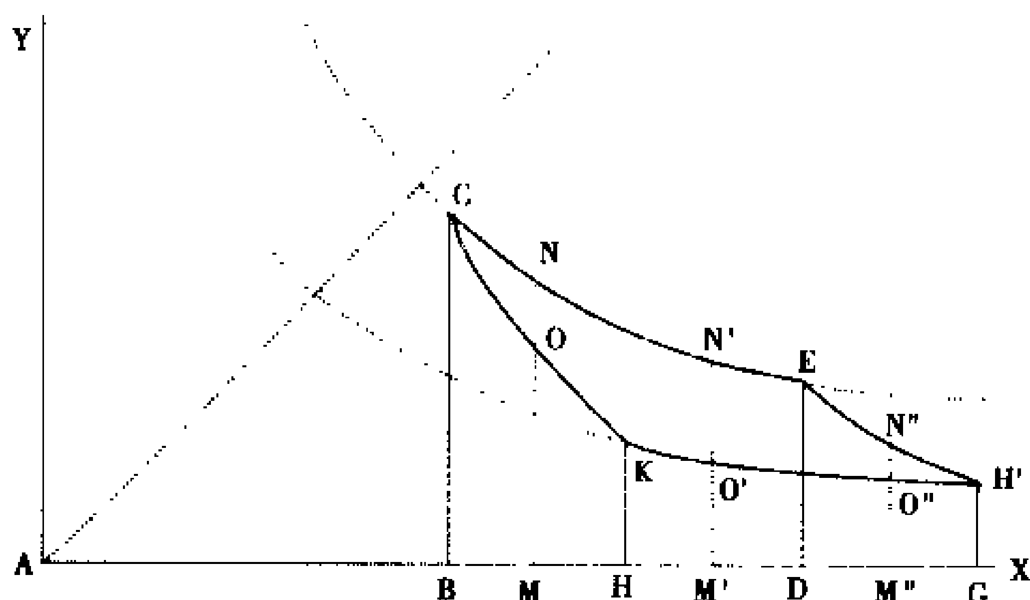


图 3.2　克拉珀龙于 1834 年在压强-体积平面上所画的卡诺循环示意图。瓦特曾经用过一幅"示意性的图",但只是私下里交换过,不过卡诺并未用过这种图。图中的坐标是压强和体积,气体被密闭在含活塞的汽缸里,汽缸可以同温度分别为 T 和 t 的两个热库接触,其中 T 大于 t。气体初始状态为 C,其体积用 AB 表示,压强为 BC。温度为 T 的气体等温地膨胀到 E,在这一等温膨胀过程中气体从温度为 T 的热库吸收的热量为 Q。气体再绝热地膨胀到状态 H',在这一过程中气体的温度下降到 t,然后气体再等温压缩到 K,状态 K 的条件为:在该等温压缩过程中气体放给 t 热库的热量也为 Q。最后,气体再被绝热压缩而回复到状态 C,完成整个循环,相应的气体温度也回到初始温度 T。伴随着热量 Q 从较高的温度为 T 的热库流到较低温的 t 热库的过程,功就产生了。根据卡诺循环的克拉珀龙表述,作功过程中热量是守恒的。

术语"等温"在物理学的条件下用来表示相等的一个个温度,这种用法是符合物理学规范的,术语'绝热'最早由兰金于 1858 年使用,用于表示当气体在隔热条件下压缩时,气体温度出现上升的情形。[资料来源:Emile Clapeyron,'Memoire sur la puissance motrice de la feu', *Journal ecole polytechnique*, 14, cahier 23 (1834), 190, fig. 1]

汤姆孙和热力学问题

W·汤姆孙在1848年—1849年间发表的关于热力学的早期论著中，完全遵循卡诺的观念：热机作功过程中热量是守恒的。虽然他认为卡诺的原理'仍然是研究热动力的最可能基础'，但汤姆孙看到，卡诺的热机在作功过程中热量守恒的论断，和焦耳的只要热机对外作功必有同功相应的热量消耗，这两者间存在着明显的矛盾。汤姆孙意识到，"热量转变为机械功是不可能的，因为根本就没有观测到过。"尽管他承认焦耳的实验似乎指出了机械功实际上转为热量了。当社会舆论还在普遍认同卡诺理论时，汤姆孙已经认识到作为卡诺的'核心公理'的所谓热量守恒假设，根据焦耳的实验应给予否定。

不过由于汤姆孙意识到热素说本身的问题，才开始对卡诺的论点产生动摇。汤姆孙知道，卡诺的热量守恒或热量不可毁灭公理，是建筑在热素说(假想有一种不可称量物质)的基础之上的。汤姆孙研究了傅里叶的热传导数学理论并把该理论应用到静电学的研究之中，使他对自然界的数学表述和物理表述之间的差异非常重视。他对卡诺的热量是一种不可称量的物质的假设引起了警惕，这也使他对卡诺的热机在作功过程中热量守恒的假设产生怀疑。

汤姆孙也看到了焦耳关于热量转变为机械功的学说也有一个根本的、完全是由热传导等不可逆现象引起的缺陷。汤姆孙指出，热量通过固体传导时并未观测到力学效应：在固体传热过程中'热的功能'如何发挥的呢？可能产生的力学效应又是什么？自然界在整个运作过程中毫无变化，能量也没有毁灭。既然什么力学后果都没有，那么又会产生什么样的影响呢？这个重要的质疑中也包含了首次把术语'能量'当作普遍的、基本的物理概念来用，汤姆孙当然知道，他采用能量概念明显不同于T·杨氏，杨氏用能量表示的只是

活力。这一质疑表达了汤姆孙的观点:焦耳的热功等当理论同热传导现象之间存在着难以调和的矛盾,焦耳理论认定能量不灭,而固体中的热传导说明能量的确散失了。焦耳理论似乎隐约说明了在热传导过程中耗费的热量用于产生机械功了。

汤姆孙对困扰热力学科学的概念危机的认识是相当深刻的。他不光看到了卡诺的热机在作功过程中热量守恒的公设同焦耳的作功必须消耗热量两者的矛盾,而且对卡诺的热素说假设本身提出了质疑。他提出了显然不利于焦耳热功等当量理论的一个极其困难的问题——不可逆热力学过程的解释问题。汤姆孙阐述了这些问题,但没有解决这些问题,他呼吁用实验证据去解决焦耳理论和卡诺理论之间的明显矛盾,他渴望自己已经比较系统地部分地解决了这一矛盾。但是实验并没有提供明确的证据用来解答,J·汤姆孙利用卡诺的理论预示水的冰点会随压强的增大而降低,这种预示已由W·汤姆孙从实验上证实了。不过卡诺的理论还是同焦耳实验的结果明显矛盾。

克劳修斯和热力学定律

建立热力学科学,是由R·克劳修斯(Rudof Clausius,1822年—1888年)以直截了当的方式,也就是以更加有利于解决问题的方式首先提出来的。克劳修斯在1850年发表的"论热的动力"的重要文章中,认为焦耳的实验已充分证明热和机械功是等价的,但焦耳的实验又是同卡诺的热机在作功过程中决不会发生热量损失的论断明显矛盾的。克劳修斯阐明作功不光是热量分布的改变,还在于热的损耗,他断言功的消耗会产生热。克劳修斯得出的结论是:卡诺理论的"基本原理"指出,当循环过程对外作功时就有热量从高温物体流向低温物体,因此卡诺理论和焦耳理论之间没有必要作出非此即彼的选择。他明确地指出,如果抛弃卡诺的在循环过程中热量

没有减少的附加判据，卡诺的原理依然成立。卡诺的循环过程中热量没有损失的假设只是一个次要的原理。克劳修斯写道："很可能在作功的过程中，有一部分热量消耗掉了，还有一部分热量从高温物体传到了低温物体，这两部分都同所作功的量存在着某种明确的数量关系"。根据从热量守恒假设分离出来的这种修正的形式，卡诺的基本原理就同焦耳的热量作功的理论协调起来了。也就是说，正比于功的热量已被消耗掉了。因此，热力学的概念基础并不是建筑在焦耳理论和卡诺理论两者的非此即彼的选择基础上，而是建筑在使两者协调一致的基础之上。

这样，克劳修斯阐明了两个基本原理，即热功等当原理和循环过程中由热作功的原理；根据这两个原理，两个不同温度等级的热库间的热量流动，有一部分热量转化为功，还有一部分热量流向较低温度的热库。克劳修斯指出的第二个原理正是卡诺理论的'真正的核心'部分，克劳修斯把这个原理解释为对经验的推广：从热量常常显示出使温度差趋于零的属性来证明他的论断是正确的。因此热量总是从高温体流向低温体。正如克劳修斯所指出的那样，这两大原理后来成为热力学的两个有名的定律。

正如焦耳所做的那样，克劳修斯从焦耳的热功等当性实验得到了另一个重要结论：热功等当性符合热量是由构成物体粒子的运动所引起的假设。克劳修斯坚持认为，这些运动粒子的活力（动能）可以转化为机械功。不过，他并没有把热力学定律的基础建筑在他的热的'力学'理论的基石上。他指出，尽管他采用了物体粒子处在运动之中和热是粒子活力的量度的观念，但他不想过多地考虑物质本身，只是在判断他的信念——热功等当性就是这种热性质的反映——是否可靠的时候才考虑物质。热是由物体粒子运动引起的假设使热功等当性成为很易理解的概念，只要热功关系的基础是力学即可。克劳修斯在1857年的著述中阐明，他很想把特殊运动的结论从某些由普遍原理演绎出来的结论中分化出来，他并不关注力

学本体论。因此克劳修斯把他认为的热力学基本定律同物质和热的特殊假定严格地区别开来[7]。虽然热力学公设或定律因而同热性质的假设无关，热功等当性还需要得到热的机械论的支持。19世纪物理学家对热力学定律和力学本体论之间的关系所采取的态度，反映了热力学概念发展的大致状况。

汤姆孙：能量守恒和耗散

克劳修斯的成就在于使人懂得了构成热力学科学基础的是两个独立的定律。在W·汤姆孙于1851年写的"论热的动力学理论"的重点论文中，谈到了他也意识到可以把卡诺理论修正到与焦耳的热功等当性理论相吻合，当然他肯定了克劳修斯的优先权。汤姆孙不但受到克劳修斯的热理论的影响，从他建立的热力学定律同样可以看到他对W·J·M·兰金的工作非常熟悉。1850年兰金提出过'分子旋涡'的假设：物质粒子周围弹性大气的转动所产生的功等于所产生的热量，借此说明热功等当性原理；为了使自己的论述能够包括克劳修斯的第二公理（修正后的卡诺原理），兰金于第二年推广了他的论证。对汤姆孙影响最大的是，兰金在1850年的论文中已经讨论了从高压锅炉的气孔中喷出的蒸气为什么不烫的道理，他用蒸气没有液化来解释这一点，结论是：为了防止蒸气液化，外界必须给蒸气供热。汤姆孙指出，蒸气从气孔中喷出时的摩擦作用使它吸收热量，他得到的结论正好为焦耳理论的适用性提供了佐证，即流体相对运动的摩擦会产生热量。因此，到1850年，汤姆孙的热力学理论中的状态概念已有所变化，这种变化促使他承认焦耳的热功互相转化的理论，这也等于相信焦耳的在热机作功时要消耗热量的说法。

汤姆孙在1851年2—3月间撰写的"论热的动力学理论"一文中，提出了热力学科学的概念所面临的问题，这反映了物理学的世界观已远远超出了克劳修斯的十分有限的所谓概念问题的范畴。

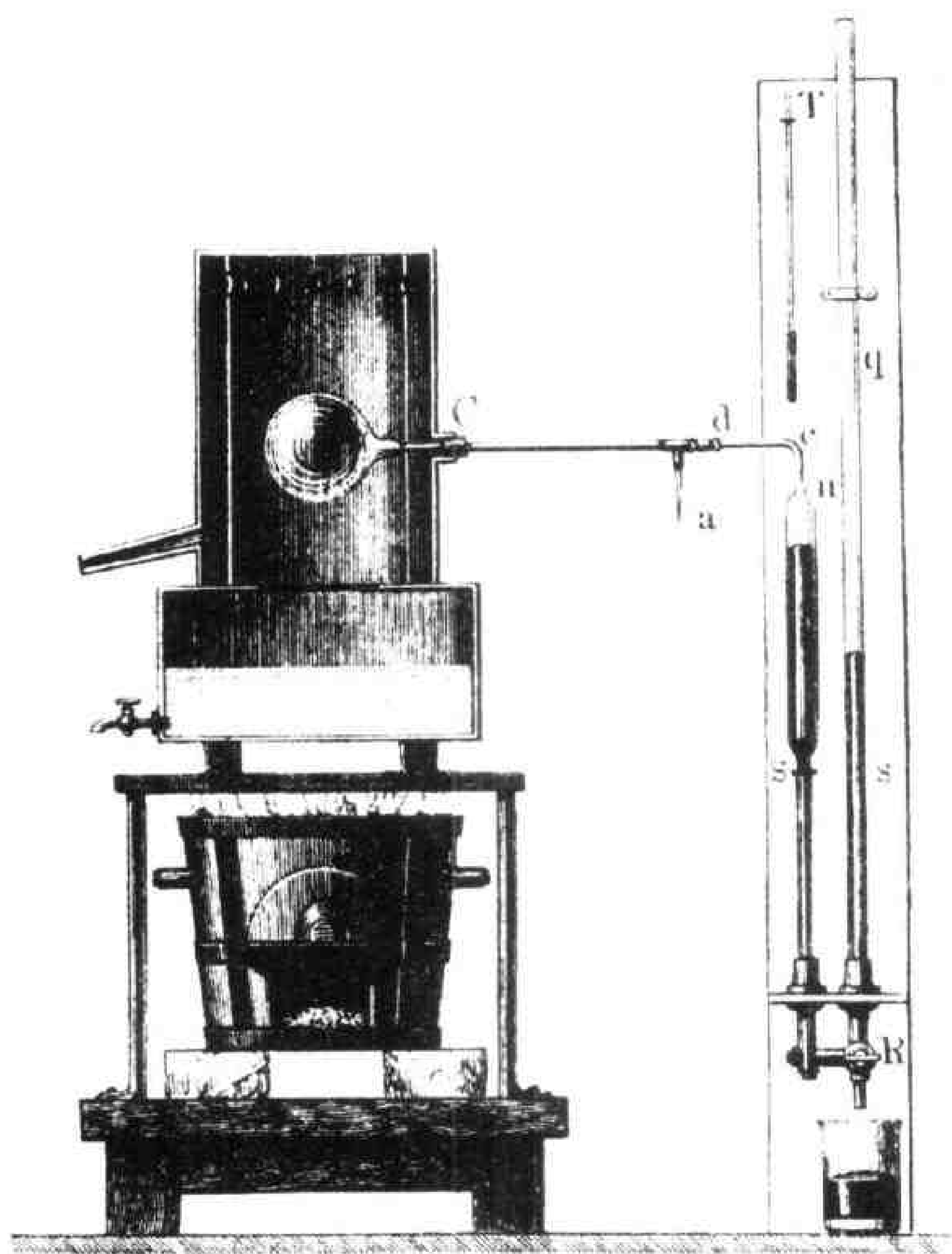


图 3.3 这是由亥姆霍兹用来演示热机中由热量产生功的实验装置。在1862年的一次关于能量物理的讲演中,亥姆霍兹解释了热机通过气体膨胀作功的运作过程。充满气体的玻璃球,置于由蒸气加热的金属容器之中,该玻璃球又与含有液体的玻璃管相连。一旦球体受热,球内的气体膨胀,这便产生功,使玻管中的液体产生移动。这个实验说明了蒸汽机产生功:球中的空气可由水来替换,使用热量可以使球中的水变为蒸气,蒸气就可以用来推动活塞,而不是抬高这里的液柱。

汤姆孙以为(后来克劳修斯也认识到),关键的问题是不可逆性的问题,“对我来说,拒绝承认焦耳先前极力主张的理论所产生的主要困难是:卡诺理论所说的在热传导过程中力学的效应是绝对没有的,除非断言力学效应决无损失,否则卡诺的说法就一定不符合动力学理论”。在接受热功等当性和热功互相转化性的焦耳学说时,正如他的论文标题所明确表达的那样,汤姆孙断言:热是由物体粒子的运动引起的‘动力学’,或者说力学理论是焦耳学说的物理基础。汤姆孙在文章中指出,焦耳确已弄清了热和机械功互相转化的含义:“热不是一种物质而是一种运动的状态。”因此‘热的动力学理论’断言,当热量通过固体传导时很可能消耗了一部分热量并产生了功,这部分功并没有失去,只是因为热已转化为物体的难以观测的粒子的运动能量罢了。尽管热量难以发现,因为它已变化并散失了,但并未毁灭。虽然汤姆孙没有说明热量消失的分子过程,也没有提出热转变为物体粒子运动能量的力学模型(正如兰金所做的那样),然而他还是(像克劳修斯所做的那样)相信热的动力学理论,以此证明热力学定律的正确性,亦即认为热力学的形式同物质的性质和热的性质的特定假设都无关。

图 3.3(续)

亥姆霍兹这里采用的是一种由亨利·维克多·雷诺耳(Henri Victor Regnault,1810年—1878年)在1847年使用过的设备的简化形式,雷诺耳是为了检测热量对气体的影响。雷诺耳的兴趣在于测量热对不同气体膨胀的不同影响,他还测量过热对不同气压下的空气的影响。雷诺耳的这些工作,都是他全力收集实验数据工作中的一部分,从这些数据可以看到气体和蒸汽机理论与实践间的密切关系。对这项研究工作虽然并没有进行理论分析,但对物理学中精确而系统的实验标准的确立发挥了作用。学生们(包括威廉·汤姆孙在内)纷纷从欧洲各地来到他的实验室从事他的实验技术研究。在描述雷诺耳的高超实验技巧时,亥姆霍兹注意到能量物理学的经验基础是相当关键的。[资料来源:哈尔曼·冯·亥姆霍兹,*Populäre wissenschaftliche Vorträge*, 2 Vols.(Brunswick,1871),2:157,fig.18]

汤姆孙强调，不可逆现象说明热流是有方向性的。他得到的修正形式的卡诺理论表达了热量从高温体传到低温体的耗散过程。在蒸汽机或热传导的有关特定事例中，过程中的热耗散并不满足理想可逆过程的判据，因此可以把这种耗散过程作为物质世界的一种基本的特性。正如卡诺所提议的那样，热机运作中热量是不守恒的，热量不是被耗散了就是转变成为功了；对汤姆孙而言，这一说法表达了克劳修斯对卡诺理论修正之后的本质含义，它说明热量从高温体向低温体流动是有方向性的。根据克劳修斯对卡诺理论的修正结果，热机中热量从高温库流向低温库，但并不是全部热量都转变为机械功。依照汤姆孙的看法，有一部分热量耗散了，变成为无法观测的功，当然耗散掉的热量并不是指热量的毁灭。

对汤姆孙而言，热力学的两个定律表达了能量的不可毁灭性和耗散性。由于耗散的能量并未毁灭而只是无法恢复而已，因此这两个定律是互相协调的。不过汤姆孙的能量耗散理论只表明能量浪费掉了但并未毁灭了。汤姆孙并未说明能量是不会毁灭的。正如 1855 年麦克斯韦向汤姆孙将了一军："你能否说明当热量通过导体从高温传向低温时是什么原因变成为热的动能？"汤姆孙的热的动力学理论不但提出了热传导过程中热量耗散的方式，还提出了一种物理学模型，根据这种模型，可以把能量不可毁灭性的公设用于不可逆过程。但对汤姆孙而言，能量不可毁灭性定律和能量耗散定律都需要经受神学的论证才可。他在起草论文时曾谈到，能量的不可变换性在上帝同自然关系的叙述中就可以看到：能量是一种无法改变的自然因素，除非上天故意行事，能量既不能创造也不会毁灭。然而正如他在文章中指出的那样，"物质世界中的每一件事物始终处于发展变化之中"，能量耗散说明物理世界不但有方向性特征，还有发展变化的特征。虽然在正式发表文章时，并没采用神学的论证办法，汤姆孙在 1852 年的论文中指出："很可能只有造物主的力量才能让机械能存在，也能让机械能毁灭"，耗散的能量不可能被

毁灭，只可能被改变其形式。因此能量的创造和不可逆过程中所耗散能量的重新集结只能交给上帝才能做到。

能量物理学的出现

汤姆孙于1854年在不列颠联合会的一次演讲中指出，焦耳的热量转变为功的发现已"使物理学经历了一次自牛顿时期以来"最重大的变革，亦即能量物理学发展起来了。他于1846年在格拉斯哥(Glasgow)的一次通俗讲演中，说明物理学的基石是动力学定律，物理学也是力的科学。根据汤姆孙的看法，到了1851年，能量已经成为奠定物理学基石的最基本的概念，汤姆孙还把这一概念推广应用到表示最基本的一切物理学现象之中。能量的重要地位来自它的不可毁灭性和可以转化性，也来自它在能量转化的环节中可将所有物理现象都联系起来的统一作用的能力。能量的不可毁灭性同能量耗散的关系，又拓宽了能量概念在所有物理过程的应用范围。研究重点从力转移到能量的过程，使汤姆孙在力学的范畴内确立了能量的地位。

汤姆孙指出，能量可以分成两大类，用他的话来说，可以分为'静态的'和'动力学的'两类。一定高度的重物、一个带电的物体、一定量的燃料，都包含着'静态的'能量。运动着的大块物体、光扰动的传播或辐射热通过的一个立方体，以及粒子处于热运动之中的物体，都储存有'动力学'能量。因此，电、光、热的现象统统都可以由能量概念联系起来，这其中的深层含意是：能量的所有形式都是'机械能'的形式，而且自然界的所有现象，不只是传统意义上的力学问题中的现象，都可以在能量的基石上归结为由力学解释的理论之中。

汤姆孙的建筑在能量第一性基础之上的物理科学，后来又由兰金在1852年和1855年间发表的文章中作了进一步发展。兰金宣

称,术语'能量'可以用于'普通的运动、机械功、化学作用、热、光、电学、磁学以及一切已知的或未知的其他动力学问题,而且彼此之间又是可以转化的或者说是可以公度的';兰金之所以强调能量概念的普遍性和统一性,因为能量的概念是在'宇宙中的一切物理能量都可以互相转化的'定律建立之后再形成的。能量转化定律适用于'实验物理学的目标'。兰金把能量的重要地位比作自然界的第一作用因素,他把'物理'科学(包括力学、热学、光学、电学)在普遍的能量概念和自然界能量守恒的框架内来定义。汤姆孙把能量分为'静态的'和'动力学的'两类,兰金则用术语'势能的或潜在能的'及'实在的或敏感的'能量所代替,(当然他所用的术语同汤姆孙的分类有些不同),不过兰金的术语取自哲学上所用的潜在的和实在的两者间的显著差别;在汤姆孙和泰特的"论自然哲学"的论文(1867 年)中,这些术语改为"势能"和'动能'了。兰金指出,'实际'能量指使物质的状态发生变化从而导致实际能量的散失,实际能量因之由势能所取代;如果这个过程倒过来,那末势能散失了,实际能量可以恢复。于是兰金指出,能量转化的基本规律为:已知能量守恒定律就是宇宙中实际的(动能)和势能之和保持不变。

正如兰金在 1855 年所描述的那样,能量的理论,或者说'动能学'的概念,是作为一种公理引用的,与物质性质的假设的不确定性无关。考虑到在他的早期文章中,他所用的分子模型完全是为了把现象归结为简单和有序而作的预备步骤,兰金强调能量概念在物理学形成系统的、公理性的和假设性的基础中的价值。能量是物质处在各种状态下的共同特性,物理学的各种现象都归属于能量这个特性,因此能量的普遍规律完全适用于物理学的所有分支。建筑在能量基础上的公设框架以及'动力学科学'的普遍原理奠定了物理学的基础。汤姆孙和兰金都认为无需关于物质性质的假设,就能得到能量物理学的普遍原理,这种理论确立了物理学的概念框架,并告诉人们如何用能量和能量守恒定律去重新认识对现象的力学解

释纲领的重要性。

转化和守恒：力和能量的概念

兰金在 1853 年关于'能量守恒定律'的表述，是物理学中各种守恒理论的综合。活力守恒定律作为力学的原理已有百年之久，它的应用同牛顿运动定律中所定义的力，在含义上有本质的差别。亥姆霍兹把他关于力的守恒原理明确地推广到包括活力守恒的原理。自然能的可转化性和力不可毁灭性的学说，有可能建立自然力平衡的概念，但是并没有想出某种定量的可准确定义的等价性理论。焦耳关于热和机械功等当性的实验演示，确立了自然力的一种定量量度关系。亥姆霍兹关于能量守恒理论的数学原理的表述使力的不可毁灭性或力恒定的概念变得更加笼统，用术语'力'来描述守恒的物理量的确是模糊不清的。汤姆孙用了术语'能量'之后就消除了这种术语上和概念上的混乱局面，重点在于能量的不同形式如何表示，正像在力学解释的限定条件下，不同形式的'机械能'都说明能量概念所起的作用是一致的。

兰金原则上为能量理论作出了全面的、理性的说明。亥姆霍兹在回应兰金对'能量守恒'的解说意见时，特别注意兰金在新用法中所包含的理性含义和术语含义。尽管自然界作用的不可毁灭性和可转化性在当时的适当叫法还是'力守恒'，但称其为'能量守恒'才是准确的描述守恒量的恰当办法。鉴于在能量守恒的数学理论的范围内，在物理学理论中删除力守恒的说法是至关重要的，把牛顿运动定律所定义的力的概念同能量原理严格地区别开来也是同样重要的。

兰金和麦克斯韦对法拉第的"论力的守恒"(1857 年)一文的回应表明了这种进展的情况。法拉第的所谓'力守恒'，表示自然能的可转化性和不可毁灭性。但在把万有引力(用引力平方反比律表

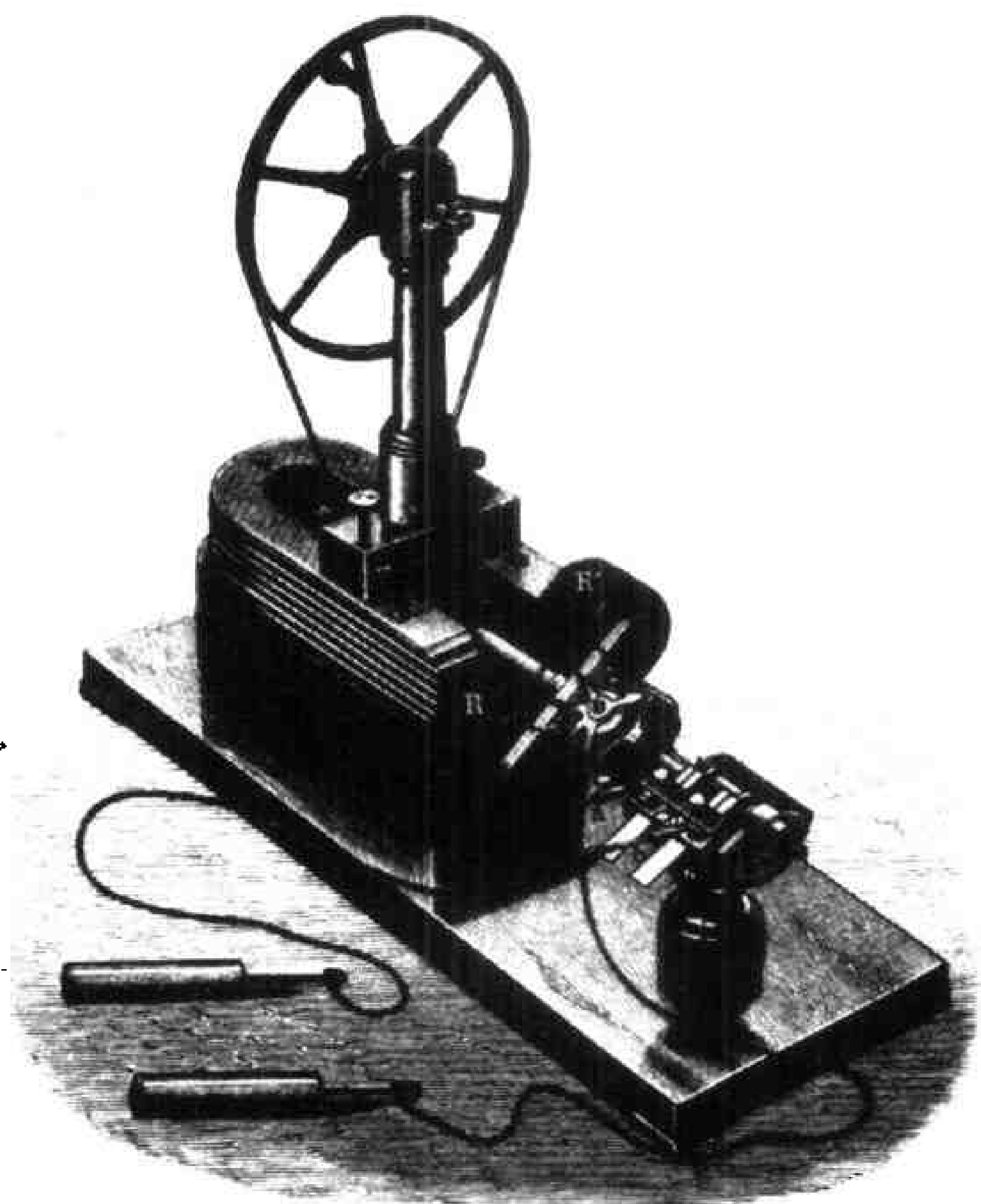


图 3.4　这是亥姆霍兹用来说明机械能转变为电能的装置。摇动手轮，使安装在两个磁极之间的铜丝圈跟着转动，从而产生电流（这个装置还可以用于水的电解，该装置有此说明）。这个称为发电机的装置，最早是由法拉第于 1831 年为了发现电磁感应而首先发明的。电磁感应即由磁感应而产生电的效应。法拉第的这一发现，是他探索电和磁相互关系的研究计划中的一部分。亥姆霍兹利用这一事实，说明自然界的各种因素都是可以互相转化的，也表明能量守恒定律是有其经验基础的。

法拉第发明了发电机，为电力工业的兴起奠定了可靠的基础，电力科学本身

示)作为超距作用的现象来加以解释时,又说力是可以创生并毁灭的;在引力作用下当两个物体彼此靠近或下降时,'力守恒原理'就丧失了,法拉第揭露了'力守恒'的术语和概念都模棱两可的这一属性。兰金的回应是,'能量守恒'这个术语才无模棱两可之嫌,将来会有用武之地。他明确指出,在力学和引力论中所用的力是不守恒的,只有能量才是一个守恒量。力可以定义为使物体改变运动状态的趋势,能量才是一个守恒量,能量由力和在力作用下物体运动发生变化所通过的距离的乘积来计量。因此力和能量都是物理上十分明确的量。

麦克斯韦在1857年给法拉第的信中,也提出了类似的否定意见,法拉第在回信中特别强调了他的力守恒概念和能量守恒定律是不同的。法拉第的术语'力'表示宇宙中粒子之间各种可能的作用本源,这些作用常被称为'自然力'。他在1859年的文章中又重提了这一说法,强调他用'力'这一术语来表示的是'物理作用的起因',而不是表示物体从甲地运动到乙地的趋势。19世纪50年代把能量概念看作至高无上的物理学家(包括亥姆霍兹、汤姆孙、兰金和麦克斯韦),都希望从物理学理论中删去传统的、数学上模糊不清的所谓力的转化和力的守恒的概念。相反,能量守恒定律却被认为是数学上明确而准确的,这也是建筑在焦耳的热功等当性的实验基础上的稳固的定律,焦耳的热功等当性本身还可看作为支持把

图3.4(续)

又反过来进一步产生了巨大的技术成果和深刻的社会影响。'发电机'这一术语(亥姆霍兹在1862年的演讲中还没有采用这个术语),首先是由从事电气工程的W·西门子(Werner Siemens,1816年—1892年)于1867年率先使用的。西门子当过亥姆霍兹的助手,也是一位实业家,他一生在电气工程上的成就卓著,他也对精密的工程项目感兴趣,他相信物理学的研究有着巨大的技术应用价值,基于这一看法,促进他于1887年建立了柏林技术物理研究所,首任所长是亥姆霍兹,该所不但研究基础物理,也从事应用技术的开发。[资料来源:Helmholtz, *Pepuläre wissenschaftliche Vorträge*, 2:174, fig.24]

热作为物体粒子运动的动力论或机械论。作为机械能守恒原理建立起来并同热的机械论相联系的能量守恒定律,逐渐成为物理客体的力学解释的基础。诸如物理量的数学描述问题,准确的定量实验问题,这些都是 19 世纪物理学理论结构的重要部分。

围绕能量守恒的解释问题,亦即对建立在对物理量和精确的定量实验的数学处理的基础上的,并成为 19 世纪物理学理论结构的重要参量的能量守恒的讨论,19 世纪 60 年代在 J·廷铎尔(John Tyndall,1820 年—1893 年)和 P·G·泰特(Peter Guthrie Tait,1831 年—1901 年)之间出现了一场就 J·R·迈耶(Julius Robert Mayer,1814 年—1878 年)在建立起能量守恒原理过程中的贡献问题的争论。廷铎尔赞同迈耶的看法,即主张以能量守恒定律为出发点并考虑到迈耶在计算上的权威性;在 1842 年发表的文章中,迈耶计算了气体在压缩过程中所释放的热量的机械等当量。迈耶打算明确地解释力科学的总体框架与化学(物质的科学)类似。正如物质的起因和化学过程中物质不灭的物质效应之间存在的因果关系那样,像运动、热、电一类的准物质或非物质实体存在不可毁灭性的证据那样,力的不可毁灭性也取决于因果关系。迈耶在讨论运动如何转化为热的时候,强调力彼此之间也是等价的,但他在计算热的力学等价性时并没有预先假定热的机械论。力的因果关系表示它们具有不可毁灭性和可转化性,而不是表示它们的全同性。根据迈耶的看法,所有的力都有相同的物理地位,它们的因果关系表示它们属于同一类力,而不去说明热可以用运动的术语给予定义。

廷铎尔肯定迈耶的立场引起了泰特的不满。泰特污蔑迈耶的思想是对实验科学的亵渎,焦耳也宣称迈耶发表了无人问津的假设,况且它也不是实验上建立起来的定量定律。在偏担他的德国同伴的过程中,亥姆霍兹想起泰特曾是迈耶的重要导师,尽管泰特后来嘲弄迈耶形而上学地提供了守恒定律的伪证。能量守恒定律的数学公式、能量概念的明确性、热功等当性的实验验证,以及对能

量的解释等等都以力学解释为基础，这使迈耶的观念从1850年到1860年的十年时间里偏离能量物理学越来越远。

不可逆性：克劳修斯和熵

克劳修斯在1850年的关于热力学定律的头一个公式中，用热流的方向性来表述热力学第二定律，即热量具有从高温物体流向低温物体的趋势。他把这个定律描述为经验的推广，同不可逆性的概念无关。在此后的论文中，他企图提出一种能够说明热传导方向的概念，而且还可以建立一个以不可逆性为自然界基本特征的概念。发表于1854年的"论热力学第二定律"的文章中，克劳修斯指出，这个定律描述了热变为功的过程中热流的方向问题。他证明，热力学第二定律也可以表示为转变为功的热量和从高温体传向低温体的热量的关系。他提出，这两种热转移从彼此可以替换的意义上说可谓是等价的。从高温体流向低温体的热流（伴随着热转变为机械功）可以由功再转换为热的逆向运作来回复，以致热从低温体回流到高温体。克劳修斯采用热传导的等价值的概念来描述热传导：在给定温度下功变为热的等当值由产生的热量除以传导的绝对温度来量度，因此热量从高温体流向低温体的等当值也就得到了。

热传导的等当值的概念说明了可逆过程和不可逆过程的差别。完成一次可逆循环过程，热量的释放等当量完全等于吸收等当量，因此构成可逆循环的各种热传导的等当值总和为零。尽管兰金曾经提出过用'热力学函数'这一术语来表示类似的概念，但他并没有用这个概念来分析不可逆过程。克劳修斯论述的明确特点是把热传导的等当值用于分析不可逆过程，因而建立了热力学第二定律的公式。假定热量从高温流向低温其等当值为正，则热力学第二定律的公式相当于热传导的等当值为正：'在循环过程中所有热传导的代数和只可能大于零'。

克劳修斯在 1865 年提议用术语‘熵’(源自希腊语传递之意)来代替‘等当值’,因此热量从高温体传向低温体的倾向就由熵的增加来描述。他当时特别注重物理过程的方向性本质。鉴于热力学第一定律表达了宇宙中的能量守恒定律,则第二定律表示能量的耗散,说明物理上的熵具有增大的趋势。熵表示物理过程的方向性,它是作为能量的对应物引进的,那是因为这两个概念的物理意义十分相似。因此,克劳修斯把这两个热力学定律说成为‘宇宙的总能量是常数’以及‘宇宙的熵倾向于取极大值’。

克劳修斯采用汤姆孙的术语‘能量’,他的两个热力学定律的新公式强调了能量概念、能量守恒和能量耗散的重要意义。为了明白汤姆孙耗散原理的重要性,克劳修斯用熵的概念去说明不可逆性是自然界的基本特征。他接着证明,热力学的两大定律都是与物体的分子组成理论无关的公设,当然他也努力想建立分子运动的基础理论,以便使熵成为物理上易于理解的概念。在 1862 年出版的一篇文章中,他引用所谓‘散乱’的思想作为物体中分子排布的量度。他用物体所含有的热量(分子动能的量度)和散乱(物体分子构型的量度)来解释熵的物理意义。在克劳修斯看来,散乱是比熵更加基本的概念,因为散乱可以用力学来解释。不管怎么讲,克劳修斯把他的热力学定律和更加特殊的关于分子运动无法观测的假设(他相信正是分子的运动才使热力学定律成为物理上变得可以理解)区别了开来,并且指出:他打算提出一种严格符合作为与分子运动假设无关的力学模型,作为对他原来建立的热力学定律的补充。

克劳修斯打算用分子的运动和分子的空间排布的术语来定义熵,这就引起了相当严厉的责备。泰特先是对克劳修斯一顿臭骂,再是捍卫了汤姆孙的热力学思想的权威性和概念的合理性,并且在克劳修斯的工作基本上被忽视的整个过程中都错误地理解熵的概念,麦克斯韦在 1871 年的《热理论》一书中本质上完全忽视了克劳修斯的工作,也重复了对克劳修斯的这种错误看法。尽管克劳修斯

的不满使麦克斯韦在书中作了修正，但对所谓散乱的概念还是持批评的态度。他十分重视分子科学和热力学原理之间的差别。尽管克劳修斯已经采用了能量和熵两个术语，设法把他的分子假设从他的热力学定律的公式中分离出去，麦克斯韦仍然认为散乱的概念是不许可的，认为散乱概念的引进只会使热力学的概念结构混乱不勘。对他来说，认为只要用分子模型来解释热力学定律都是不恰当的。他所得出的结论是："我想我们现在能做的也只是对物体的动力学性质和热学性质进行研究，我们定义的热力学，完全是从我们叫作热力学第一和第二定律中演绎出来的，并没有对物体的分子组成作过任何的假设。"

克劳修斯在他的论气体运动论的著作中，曾经花了大量笔墨讨论深藏在热学现象下面的分子过程的理论，这就说明他相信热力学定律可以由分子构型的理论加以解释。与克劳修斯形成鲜明对比的是，麦克斯韦认为，热力学第二定律本质上是一个统计定律，描述的是大量分子的行为，它不可能由个别分子运动的理论来加以解释，因此他想尽量搞清第二定律与他的气体分子运动的统计理论之间的关系。

不可逆性和宇宙学

W·汤姆孙在表述他的热力学第二定律的过程中，始终注意到不可逆性的重要性。他看到随着宇宙的不断演化会伴随着能量的耗散，这种看法同圣经里认为宇宙短暂性的观点是协调的。能量是守恒的，不过又是不断以不可逆的方式耗散的。他在 1852 年的一篇题为"自然界机械能耗散的普遍趋势"的文章中，得出地球历史的发展趋势是：随着能量的耗散，地球将变得越来越冷，再经过一段时间后，地球就不适于人类的生存了。地球的热量以不可逆的方式不断地耗散掉，汤姆孙的这一结论同 C·莱尔（Chavles Lyell）的地

质学理论是矛盾的，莱尔的理论认为，经过地质学中各种过程互相平衡，使地球处于稳定之中。19 世纪 60 年代，汤姆孙根据他的理论计算了地球的年龄，指出地球演变的时间还没有长到某个所说的地质缓慢变化的稳定阶段，也没有到达达尔文的自然选择的进化论阶段。

19 世纪 50 年代人们对宇宙论发生了极大的兴趣，汤姆孙则发展出一种太阳能学说，他指出流星沿着螺旋型轨道进入太阳的大气层，最终撞击到太阳上并产生太阳的热量。他坚持认为太阳系中一切能量传递都可以回归为太阳能，而太阳的热量则由太阳的大气与流星蒸发的以太涡旋互相摩擦来维持。亥姆霍兹在 19 世纪 50 年代也讨论过宇宙学问题，他是根据康德和拉普拉斯提出的所谓的"星云说"——这是一种太阳系是由形成太阳和行星的气态物质通过凝聚作用起源的学说——来讨论能量的。亥姆霍兹在论证中指出，太阳是由一团炽热的熔融物质组成的，炽热来自流星的撞击，正是这种碰撞才产生太阳的热量。汤姆孙后来也同意了这种流星撞击的假说，虽然他认识到太阳的能量不可能靠流星来维持。但汤姆孙很快就觉察到，根据这种修正的理论，流星学说意味着太阳系的年龄是很有限的。亥姆霍兹同样注意到，根据耗散原理，机械能转变为热说明一切能量最后都成为热能，这样又会使一切自然过程完全停止：'宇宙从此开始可能永久停留在休止的状态'。克劳修斯在 1867 年重新把热力学第二定律的宇宙学结果，用熵的术语表示为宇宙的'热寂'。他观测到，当宇宙的熵达到它的极大值时，不可能再发生新的变化，因此'宇宙就会处在这个毫无生机的死亡状态中'。

有不少物理学家对这种悲观的论点提出了怀疑。亥姆霍兹自己也注意到宇宙很可能是有边界的，虽然光和热都可能从太阳系散失到外部的空间中去，但这个边界也可能使散失的能量重新集结。兰金提出了一个类似的假设，他坚持认为，自然界虽然沿着把各种

能量都转变为热的方向演化，但这并不一定表示一切物理过程的终结。很可能当光和辐射热穿过星际空间的以太时，以太可能就起到边界的作用。一旦宇宙的辐射热到达边界时，又会完全被反射回来并重新集结，因此物理宇宙又可以重新集结它的能量并重新开始运转。因而能量的散失又发生相反的过程，即能量得到恢复、宇宙又重新建立起来了。兰金推测很可能会出现一种稳定状态：随着时间的推移，能量散失的逆过程，即能量集结，使宇宙的能量不断地散失后又不断地集结。

不过在 1875 年出版的由泰特和 B·斯图尔特（Balfour Stewart，1828 年—1887 年）所著的《看不见的宇宙》一书中，采用了汤姆孙的观点描绘了有关的争论情况。本书的目的是回击哪些关于物理学说是唯物主义的、违背教义的批评。作者承认汤姆孙的定向宇宙学说是对的，坚持认为宇宙中的能量耗散只说明具体的或可见的宇宙才是短暂的。不过他们建议，耗散了的能量也许经过看不见的以太流到一个看不见的王国去了。然而看得见和看不见的宇宙的总能量是不可毁灭的、守恒的，只是可见宇宙的能量才是暂时的、不断耗散的。具体的宇宙是衰变的，看不见的宇宙才是永恒的。在能量守恒定律（支配看得见和看不见宇宙间能量传递的规律）下，在给天意作用归类时，这些自我责备式的论述当然是有争议的。但不管怎么说，本书阐明了 19 世纪物理学的文化分支情况，汤姆孙断言，只有上天的作用才能创造能量或毁灭能量，焦耳和法拉第论证说神的意愿是由神的智慧和预见表述的，宇宙就是根据神的旨意用力的不可毁灭性的程序建立起来的。求助于神学的论证，并不是英国物理学家的主流，这只说明‘自然神学’的传统一直在产生影响。麦克斯韦通过对星际光谱和地球光谱一致性的论证，说明宇宙中的分子都是相同的，因而他的结论是：分子就像一种‘工艺品’，它们的共同性说明它们是按神的旨意来设计的。这些论证说明，不少物理学家千方百计地把神学的教条溶入到他们的物理概念中。同具

体宇宙的创生和终极密切相关的能量守恒和耗散，为这些论证提供了重中之重的佐证。

能量物理学和'动力学'解释

汤姆孙和泰特在"论自然哲学"(1867 年)一文中重建了分析动力学，强调了将拉格朗日广义运动方程的物理基础与能量守恒定律结合来确立分析动力学的框架。这些方法对英国物理学家普遍赞同的'动力学'理论产生了很大的影响，这类理论都是从分析动力学出发，选择特定力学模型来建立的。汤姆孙和泰特在 1861 就着手讨论他们的计划，并很快在术语的使用上取得一致。他们决定采用'动力学'而不是简单的'力学'这一术语。这就说明抽象动力学的数学科学和力学的经验研究是不同的，因此力这个概念的重要性也更突出了。汤姆孙和泰特强调在牛顿运动定律的假设基础上采用物理方法，而不是采用完全抽象的数学方法，导出可以用来解题的解析定理的广义运动方程。他们发现力的平行四边形原理、虚功原理和达朗贝尔原理都完全可以从牛顿运动定律导出(因为牛顿运动定律是由实验建立的物理概念)，而不是由解析定理导出。

汤姆孙和泰特都认为运动和力的作用的描述都属于数学力学的基本问题，它相当于把这门学科细分为运动学(抽象地研究运动)和动力学(关于力的作用的科学)两部分。研究力的动力学又可以进一步细分为静力学(在静止状态下力的作用)和运动学(维持运动状态不变条件下的力的作用)。从汤姆孙和泰特把静力学作为动力学的一个分支来讨论静力学的地位看来，他们的论述重点是关于力。他们的论证指出，静力学可以从牛顿第二运动定律导出，并被认为静力学是在保持动力学平衡时力的作用的一种表述方式。

他们在描述动力学时，基本的数学公理就是汤姆孙所发现的定理，该定理把冲力作用下系统发生的变化同系统的动能联系起来，

这样广义运动方程就可以从冲力的假设下推导出来。由于冲力的作用是在很短暂的时间增量内发生的,他论证说,冲力的作用并不会改变系统的构形和势能,只有动能才会发生变化。汤姆孙和泰特注意到,这种方法的长处在于避免了为系统建立力学模型,同时通过对冲力作用下的数学论证手段,使研究重点始终放在物理客体上。麦克斯韦在他的《论电和磁》(1873年)一书中,把这个问题说得特别清楚,这项工作也应当归功于汤姆孙和泰特引进的动力学方法。麦克斯韦指出,力学系统背后的结构,原则上可以用无穷多种可能的力学模型来描述,然而动力学理论的公式毋须考虑系统各部分之间关联的深层机制问题。根据麦克斯韦的看法,汤姆孙和泰特采用冲力理论得出的抽象动力学公式,从重视分析动力学的物理基础和力的物理重要性两方面来看,已经发展成为拉格朗日的广义运动方程了。

在强调回避特殊力学模型的描述时,汤姆孙和泰特在论证过程中把能量守恒定律放到一个相当突出的地位,他们指出,由系统部件的运动和构形决定的物质系统的能量在不涉及到系统构形和运动的深层机制的情况下就能给予说明。在建立方程时,说明这种机制的坐标是不必考虑的。他们宣称,由于系统的平衡条件和系统的运动条件都可以从能量守恒定律导出,因此能量守恒定律是理解整个抽象动力学的基础。汤姆孙和泰特同样把能量的地位作为基本的物理概念来考虑,明确地指出'能量是实实在在的,它像物质一样是不生不灭的'。能量和物质都是自然界的基本成分,并且力学解释纲领就是在能量概念和能量在抽象动力学形式下的应用的基础上完成的。

麦克斯韦在《物质和运动》(1877年)一书中对力学所作的基本论述中,对汤姆孙和泰特关于能量守恒原理在难以观测粒子系统中应用的看法作了归纳。他觉得这类系统的能量是由系统的构形和运动所决定的,即使电磁系统的力学结构是未知的,汤姆孙和泰特

所发展的方法也不要求对深层次机制的了解。由于电磁系统是由构形的势能和运动的动能来描述的，因此毋须了解系统深层的力学构造，就可以将动力学应用于电磁现象；这种普遍的动力学解释程序是建筑在像物理实在的基本构件那样牢固的能量的基础地位上的，也是建筑在像统一的动力学原理那样坚固的能量守恒定律的基础之上的。

第四章
物质和力：以太和场论

‘磁场’这一术语是由法拉第于1845年引进的，后来又被汤姆孙和麦克斯韦所采用，但他们的用法明显地反映了法拉第的观念。汤姆孙在1849年给法拉第的一封信中，讨论了磁学的性质，期间最先用了‘力场’这一叙述；麦克斯韦则在1854年给汤姆孙的信中，在讨论法拉第的思想的表述中最先涉及到‘磁场’这个术语。麦克斯韦在他的“电磁场的动力学理论”(1865年)一文中，给‘场’这一术语作了最早明确的而且同以往的用法完全一致的定义；他在论文中指出：“由于电磁场必定与带电体或磁性物体周围的空间有关，因此我提出的理论可以称之为电磁场理论。”场的概念与电的超距作用理论形成了鲜明的对照；那就是说，力是通过各个带电体之间的空间存在的场的所谓连续元素的作用机制传递的，这种力的作用方式不同于带电体间跨过有限空间直接发生的作用方式。

麦克斯韦关于场的定义含义极其广泛，很明显，这就使场的物理状况不能唯一地确定。在场论中，物体间的力是通过物体周围空间的某种性质或者场来传递的。场既可以表征为力场，也可以用力的空间分布的术语来表示；甚至还可以换一种说法，即场的传递性质可以用中介以太的术语来表征，设想以太是填满的或是由离散粒

子构成的。在由粒子性以太所描述的场中，以太粒子只对紧邻粒子有作用，只有以太连续体的粒子间才有力的传递作用。法拉第提出了两类理论：一是假设的只有空间力线的理论，二是假定的电作用是通过布满物质（电介质）空间的连续粒子的作用来传递的理论。这两种表述为场概念的后续发展奠定了基础，麦克斯韦关于场的定义涵盖了场的这两种物理表述。

适宜于用数学公式来描述是场的重要特征之一。麦克斯韦证明：用偏微分方程的数学语言是场的物理结构的恰当表述。电磁场方程涉及的量包括场变量的连续函数，而这些方程则表达了场空间相邻无穷小元素之间力或能量的连续传播。场的物理结构并不能唯一地加以确定；它可以被描述为充满着力、连续性流体或粒子以太。麦克斯韦发现偏微分方程能把任意给定点的电磁变量同邻近点的电磁变量联系起来，他还注意到，只要数学形式与他的用物质粒子的运动机制来描述的场相一致。这些方程就可以表达"介质各连续部分之间产生作用的理论"。

法拉第的场论

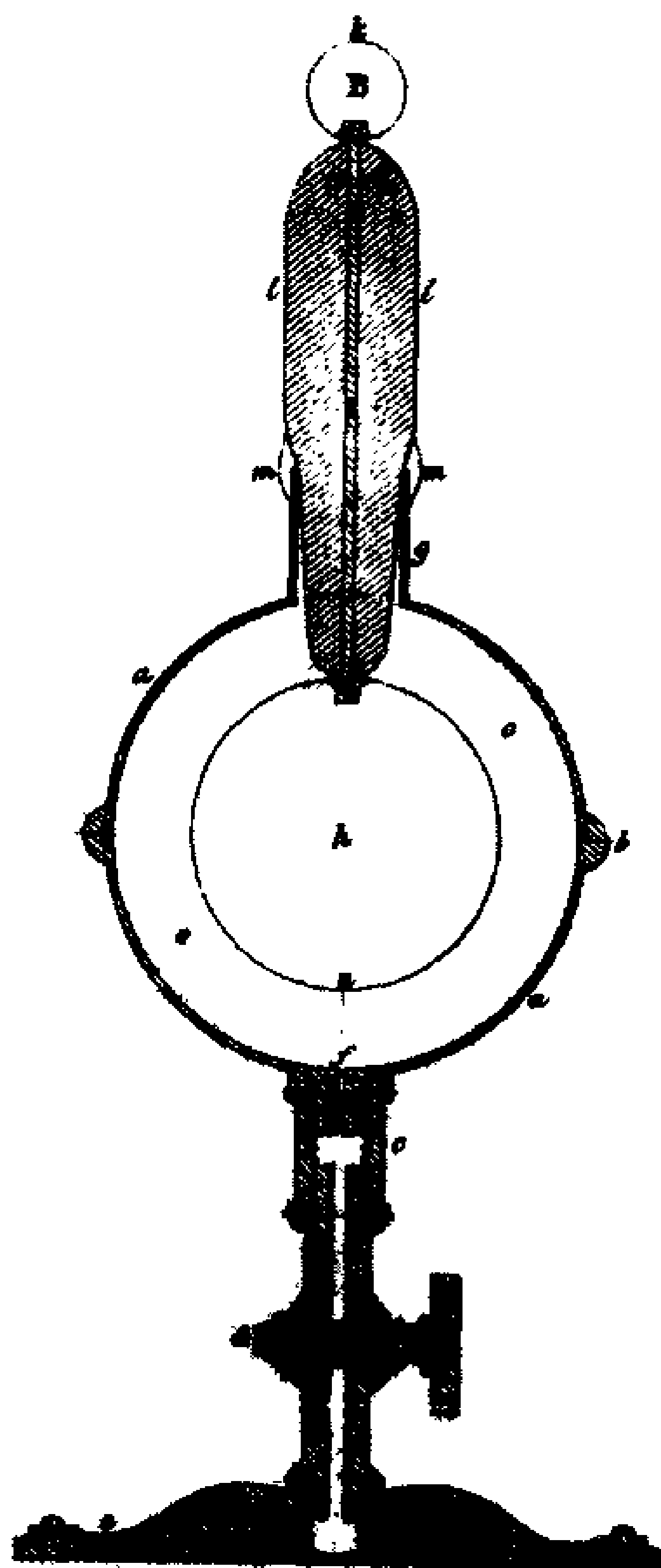
法拉第在 1831 年发现的电磁感应向人们提出了电磁力如何传播的问题，也就是电磁力同力传播赖以经过的材料物质之间的关系问题，亦即提出了绕在铁环上的初级线圈和次级线圈的电磁力如何传播的问题。法拉第指出，电流流过初级电路使铁环粒子产生电'张力'的状态，这是一种所谓的'电振奋状态'的物质电学条件。电振奋状态的出现使次级电路产生电流，一旦初级电路中的电流断开，电振奋状态也随之消失。因此，一旦铁环粒子进入电张力状态，电磁力的传播也随之产生。

法拉第在关于电化学和静电感应的 19 世纪 30 年代的论著中，精心设想他的所谓电振奋状态的概念，他把这种状态描述为物质分

子的极化；所谓极化，是指作用在同一分子的不同部分上的电力的方向相反；他还将电解描述为物质粒子的力传输。他在阐明静电感应沿曲线方向传播时指出：静电感应是由带电体周围的电介质粒子间的力传递产生的。法拉第从实验上证明，不同物质传递静电力的能力不同。他断言：介质传递电作用受产生传送静电力的所谓粒子的电张力状态的制约。法拉第强调了电力的空间分布，这是奥斯特曾经强调指出的概念，而且安培在论述关于电以太在传递电力过程中的中介作用时也作过这样的推断。

法拉第也用过力线的概念作为极化粒子在电张力作用下的排列的几何描述。但在19世纪30年代，他在使用术语'感应力线时，只是表示动力方向的一种临时性的常规模式'，也说明他赞同电振奋状态以及电力由某种极化粒子的接力作用产生的思想。他不同意把粒子的极化说成为因为互相接触，粒子并非通过相互接触发生作用，而是通过它们彼此间的极化力的协同作用才发生作用。相邻粒子之间的距离并不重要；虽然他对静电力只有限制在所谓敏感距离之内才能传播的解释持否定态度，他也反对超距作用的解释，但他也说过粒子跨过半英寸距离还能发生作用的话。为了对他那种自相矛盾的说法作出批评的反应，法拉第断言自己在论证中没有任何矛盾，并重申他的在连续粒子间可以发生作用的思想是正确的。尽管法拉第关于紧邻极化粒子间电力传递的概念并没有就力如何传播的机制作过解释，很显然他把电力设想为带电物质周围粒子所处空间中的一种表现方式。这些概念都是18世纪电学理论的特点。

不过，这样的解说并没有揭露法拉第理论中的缺陷，只是说明法拉第并没有对极化粒子间的相互作用力作出应有的解释。法拉第强调的是极化的概念，而不是讨论粒子与它们相伴的力的关系。为了正视这一问题，他着手考虑关于物质性质的根本问题。早在19世纪30年代，他虽然指出电与物质粒子紧密相关，但他着意不


k
B
l
l
m
m
g
a
c
A
b
c
a
f
o
d

讨论物质的性质,而把注意力放在电作用和粒子的极化上而不是放在对物质论的深入研究上。关于"电导和物质性质的推测"(1844 年)一文中,确立了系统的物质论以及力的作用机制,不过只注重对力在空间传递的描述。在此过程中,法拉第放弃了物质的原子论并改变了他的关于力传递的理论。

法拉第在思考过程中指出,根据原子论,原子并不是彼此接触的,而且如果紧邻粒子间的作用不存在的话,那就必须说明原子之间的空间会有一种传递粒子间的力的作用。根据他的看法,空间不具有类似于材料物质的因果特性或分布特性(正如他后来所说的,'纯空间不能像物质那样起作用');因此,他的结论是:原子论和虚空都应该抛弃。他声明:物质的所有知识都必须限制在材料物质的'力或动力'的概念范畴之内加以认识,他断言:物质不可能是由广延的不可重叠的原子所组成的(原子周围受引力或斥力的控制),而是应该设想物质是由充满空间的'动力'媒体所组成,即'物质由动力组成'。这一理论否定了原子的不可穿透性和不可分割性。如

图 4.1 法拉第(1837 年)用来说明比感应容的实验装置。法拉第试图通过演示物质的比感应容来建立他的介质粒子如何极化的理论和'电振奋状态'的理论。该装置由两个黄铜球壳 a、b 组成,两者互相嵌套,内球 b 通过铜棒 i 与另一铜球 B 相连,铜棒外围镶嵌着绝缘的圆柱体套壳 l。通过使装置带电,法拉第可以测出随着两球间不同绝缘物质的填充所对应的感应电荷的变化。为了确保准确和可重复的实验结果,他详细地描述了实验中的注意事项,因为为了减小实验条件对结果的影响,实验必须十分细致。

比感应容现象的实验证明电感应的大小同传递的感应物质有关。法拉第的结论是:电感应是由绝缘介质粒子的传递作用造成的,电力正是通过绝缘介质起作用的。实验结果有力地证明了他抛弃超距作用的电学理论是正确的,而且他强调电介质在传递静电力过程中的中介作用也是正确的。[资料来源:Michael Faraday, *Experimental researches in electricity*, 3 Vols (London, 1839—55), 1: pl. Ⅶ, fig. 104]

果说‘物质可互相穿透’，那么连续粒子间的力传递方式的问题也就迎刃而解了，‘物质是整体连续的，在考虑物质时我们不必考虑物质的原子和所处空隙间的差别’。借助其‘动力’的本质，可以定义物质的性质；物质连续地向四面八方的空间延伸，物质‘粒子’间的相互作用就是所谓‘力中心’间的相互作用，也可以认为动力的分布是在空间弥散开的。

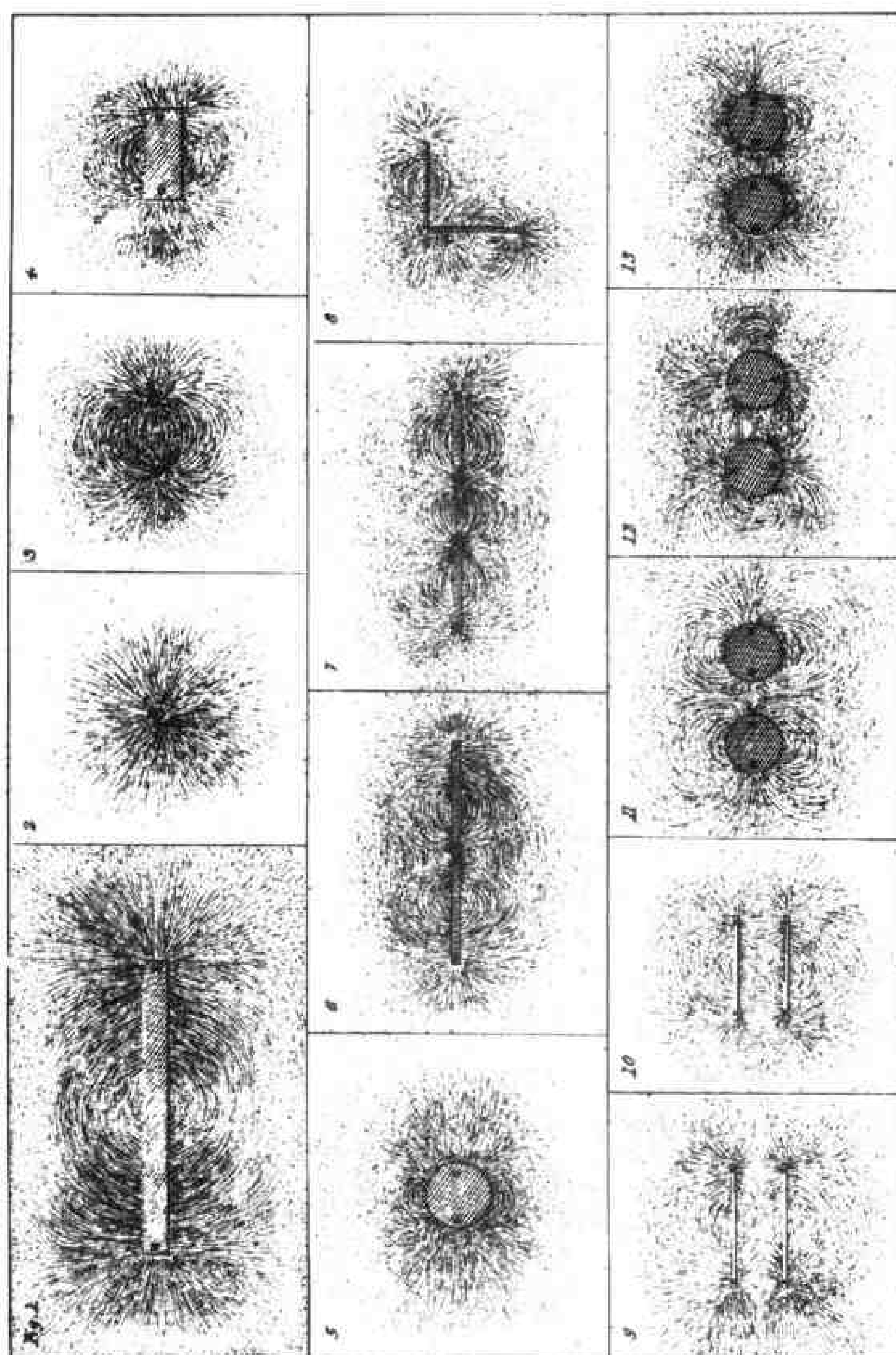
法拉第指出，这种物质论同 18 世纪中期 R·J·博斯哥维奇(R. J. Boscovich)提出的理论很相似；但是博斯哥维奇的观念同法拉第的差别很大，因为博斯哥维奇并不是用固有的动力，而是坚持用牛顿的力和物质的二元论来定义物质，即假定物质是由产生引力和斥力作用的实心点所组成的。法拉第的物质论的确同 18 世纪 70 年代由约瑟夫·普里斯利(Joseph Priestley)提出的看法十分相似。普里斯利坚持认为物质的明确特征是：物质具有延展性和固有的引力和斥力。他反对牛顿的原子论假设——物质的根本属性是不可穿入性和刚性——普里斯利则用力去定义物质的本质，并以此代替原子和力的二元论。普里斯利含糊其辞地说明他的理论同博斯哥维奇的看法相似。普里斯利的论述(通常也被称为‘博斯哥维奇理论’)在 1780 年至 1830 年间出版的教科书中广泛流传。法拉第把他的理论归功于博斯哥维奇，这种看法尽管不妥，但是也在情理之中。

对于物质的‘推测’理论，是法拉第考虑力传播理论中最本质的最早构想。在他的“论振动谱线的思想”(1846 年)一文中，法拉第指出，他的作为力的集结的物质论使他考虑到：把力传播描述为力线的振动。力线的概念可描述物质通过空间的扩散，因此也说明了材料物质在空间的分布：“假定只有存在力才有粒子，有力的地方才是粒子”。布满力线的空间代表材料粒子间的相互作用。在 19 世纪 30 年代，法拉第只是把力线的概念用来描述极化粒子的空间排布，但是，他的物质新理论却含有用力线来描述材料物质的结构和材料物质相互作用的意思。这就使他最终抛弃了用电振奋状态

来描述物质粒子极化的观念,而是主张用原先的力线理论去描述作用力的传播。作为磁学现象的研究结果,他开始用'极化'这个术语,只表示在力场中力线的方向。

法拉第的初始力线理论是经过他在一系列非凡的实验研究过程中发展起来的。1845 年,根据 W·汤姆孙的提议,法拉第又一次试图检测磁力对偏振光的影响,即测量磁铁对光偏振方向旋转的影响。这一发现以及此后由磁性引起晶体轴线取向发生变化的发现,导致他用磁力线的方向去解释这些现象。他把不同物质的不同磁学特征解释为力线穿过不同物质的性质,亦即力线在不同物质中有不同的磁导率。法拉第用磁铁周围铁屑排布的花样来演示力线,他在 1852 年的题为"磁力线的物理特征"一文中,勾勒了新概念的大致框架。他明确指出,'力同力之间的关系只可能是力通过周围空间的曲线同曲线的关系,而且如果中介空间中没有物理实在的东西存在,我们便无法设想力的曲线是何道理'。力线是物理实在的最原始实体,并不是只是表示极化粒子排布的符号。法拉第说,他不打算'用物质去填充空间';他的由力连续地填满空间的物质观,与力线在空间中分布的空间结构并不一致。

法拉第引进了两种独特的场表示,一种是以周围介质的连续粒子为中介的场,另一种是断言力线为第一性的场。虽然法拉第的确提出过力的传递'可能是以太的作用'的建议,但是并没有得到对力的传递机制提出解释的理论。为了对法拉第的场论作出响应,汤姆孙和麦克斯韦试图从以太的力学理论出发,发展出力传播的物理理论,他们认为法拉第的观念在物理上是明智的,也是再一次以力学解释为纲对力传递术语所作的系统研究。麦克斯韦强调指出,对场的机制作系统的'前后一致的表述'是重要的,他为了得到电力传播的'建设性表示',从卡尔·弗里德里希·高斯(Carl Friedrich Gauss,1777 年—1855 年)的论述中得到了场的一个表达式。



汤姆孙：以太和场

汤姆孙在 19 世纪 40 年代关于电学理论的最初研究工作中，已经探讨过热现象和电现象之间的数学相似性，仿照傅里叶理论的热，他提出了从源流出的一种电力数学分析方法，这相当于热通量的分析方法。汤姆孙在开始研究法拉第的静电理论时，觉察到热现象和静电现象之间具有数学相似性，由此他提出了物理上的相似性。热量从一个粒子到另一个粒子传播的物理模型，启发人们认为电力也是'通过某种介质的连续粒子的作用'以相似的方式传播的，这正如法拉第的由电介质的连续粒子来传递静电力的理论一样。不过，汤姆孙仔细地分析了数学表示式和物理假设的形式的差别后指出，他并不打算对电介质粒子间静电作用如何传播问题作出精心的假设。尽管热现象和电现象之间的数学对应性并不能说明静电力传播的物理猜测性假设一定正确，但是数学上的对应性暗示：在连续粒子间传递作用的理论基础上，很可能可以建立起适当的模型。这些说法引起人们重视数学表述和物理描述之间的差别，

图 4.2　法拉第用铁屑演示的磁力线的草图（1852 年）。这些图表明铁屑在磁铁周围分布的大致形式。图 1 说明条形磁铁四周的花样；图 2 为单磁极周围的花样；图 3 为两个极性相反的磁极间的花样；图 4 说明短磁铁的花样；图 5 为磁化钢盘的花样；其他各图显示出当磁性极性发生变化时的花样。在法拉第关于磁力线所描述的磁动力理论的实验演示中，他利用这些花样图来表示磁力线的方向。他对实验步骤的描述是正经的，通过这样简单的演示实验，也能明确地说明实验的条件：在上面撒铁屑的那张纸的性质，铁屑的干洁度、铁屑要用细网筛来撒布等等都要精心操作。他指出，使用铁屑只是使磁力线成为肉眼可见而已。

1852 年之前，法拉第采用'力线'这个术语只是用来表示力的分布，但这时他已明确指出，力线有它的物理实在性。他认为用铁屑来演示磁力线的图像，完全证明了他的磁力是曲线力的论点。［资料来源：M. Faraday, *Electricity*, 3: pl. Ⅲ］

这也是傅里叶的热解析理论的关键问题，汤姆孙已经采用了傅里叶的方法去研究电学理论的数学结构和物理结构的问题。汤姆孙也注意到法拉第并没有对介质连续粒子间的分子相互作用机制问题作出解释。

汤姆孙试图在其“关于电、磁和电流力的力学表述”(1847 年)的基础上解决这一难题。这篇文章用弹性固体的线应力和转动张力的术语来分析电磁力的传播问题，采用的数学方法就是斯托克斯提出的处理连续介质的转动和应变所用的方法。法拉第关于磁光转动效应的发现，与弹性固体的转动应力所描述的磁力是一致的，因此，汤姆孙建议讨论电、磁力传播的力学理论。他在 1847 年 6 月的一封信中告诉法拉第，“电磁力同弹性固体中传播的应力的数学相似只是一种略述而已”。汤姆孙指出，他不打算为电磁力的传播提出具体的理论，虽然连续介质中应力的力学模型具有具体的确切含义，但力学的应力同电磁现象间究竟存在怎么样的关系，物理上仍然很不清楚。

此后汤姆孙开始将法拉第的磁场理论作为力线的结构，并研究它的数学表述。在 1849 年 6 月给法拉第的一封信中，汤姆孙画了一张磁场中力线的分布图，图上他用术语‘力场’去说明物质对磁力线的磁导率，他在 1851 年的一篇题为“关于磁学的数学理论”的文章中提出了磁场这一概念。他把磁场描述为‘想象的磁性物质在空间连续分布的场’。在肯定磁力是磁性物质各部分之间施加的力的同时，汤姆孙并没有就磁性物质粒子间的磁力如何传播的问题作出相应的物理模型的假设。并不能把‘磁性物质’设想为材料物质，‘磁性物质’却可以设想为法拉第的力线至上理论的一种化身，这种布满空间、代表力场的空间分布的所谓化身，可以对力线在空间的分布作出数学表述。汤姆孙强调了数学描述和物理表述之间的差别。他关于弹性固体的应力理论以及用磁性填充体描述的磁力线，并不打算为场的物理结构建立模型，只是想为场的数学理论

提出具体的说明或比较而已。

在1856年发表的一篇重要论文中,汤姆孙希望为物理场提出所谓的'动力学解说'。他对构成物理场的分子的运动的讨论,对此后的场论发展产生了很大的影响。吸收了他在热的'动力学'理论中所用的分子运动论的概念,并且还采纳了兰金的以太大气围绕分子核作涡旋运动的热理论之后,汤姆孙证明,法拉第发现的磁-光转动也可以用以太的涡旋运动来解释;一切电-磁吸引或排斥的现象和电-磁感应的现象都可以被简单地视为构成热的运动物质的惯性和压力来加以解释。热的动力学理论提供了场的物理理论模型。不过汤姆孙的确并没有采用由兰金最先建立的所谓'分子涡旋'的概念。在汤姆孙的热理论中,在遵循热是分子运动的一种形式的普遍假设的同时,小心地回避了兰金的分子模型的特殊性,有意提出了以太的物理结构问题,以太的运动构成了场。他猜想,以太是填满宏观物体的分子之间空隙的连续流体,以太也可能是由离散分子构成的,也可能所有物质最终都是连续的,甚至物质表观的分子结构也是由连续以太的涡旋运动所产生的。

在19世纪50年代后期,汤姆孙赞同把以太设想为流体的理论。他致力于以太的物质结构问题和以太与物质的关系问题的探索,从他的1858年的未发表的论文手稿中可以看到这一点,这期间他执着地认为一切物质都是连续的,亦即建议"普遍充实说"。他的推测极可能把物质设想为"流体的运动或涡旋"。根据以太填充物的理论,物体的分子结构、刚性和不可穿入性都是由理想弹性以太连续体的涡旋运动造成的。但他发现这些推测都没有物理实在的可能性,因为填充体中的涡旋好像不具备不可毁灭性,而不可毁灭性对任何物质成分的原生理论来说都是至关重要的。

汤姆孙在1867年"论涡旋原子"一文对这些猜测作了解答。亥姆霍兹曾经证明理想流体中的涡流流线在流体中不会毁灭或消失,因此完全符合汤姆孙的本源原子不变性判据,亦即本源原子只有在

图 4.3　麦克斯韦给威廉·汤姆孙的一封信(1855 年)的片段辑录。像对待他的好友斯哥特·汤姆孙一样,麦克斯韦早在 1854 年与斯哥特交流了电学理论的信息,麦克斯韦是剑桥毕业的数学家。随着斯托克斯、汤姆孙和麦克斯韦的工作的深入开展,数学分析在物理学问题中的应用越来越普遍并越来越成熟,他们三位的工作使英国物理学的数学特点越来越明显。虽然英国的大学中专门为理论物理设立了不多的几任教授职位,但从 1850 年到 1900 年的 50 年时间里,英国几乎有一半的物理学教授职位是由受过剑桥数学学院教育的人担任的。

'造物主作用下'才能创造或毁灭。汤姆孙受到了亥姆霍兹的文章的激励,况且他还受到泰特用烟圈的性质演示亥姆霍兹理论的实验事实的鼓舞。汤姆孙在回应过程中建立了自成系统的'涡旋原子'的理论,这种推测性的理论似乎没有得到经验理论的支持,连续以太之内的旋转运动奠定了物质论的基础,因此也为场论提供了基础。汤姆孙明确指出,'亥姆霍兹环是唯一真实的原子',他的涡旋原子则放置在填满空间的媒体中,其行为特性会沿着涡旋线传递。普遍的媒体理论认为原子是以太中的非连续性部分,因此如何解决以太和物质的关系问题以及物理场的作用方式问题,这些问题都是由法拉第提出,汤姆孙与之打了 20 多年交道的问题。为了给场提供物理理论,汤姆孙借助一种以太的力学理论,他在论磁光转动的论文中提出的动力学模型为涡旋运动的物理理论所证实。因此,场的作用是通过以太媒体实现传播的,力场的概念也可以用以太媒体的运动来描述。

图 4.3(续)

正如他在这封信中所说的,麦克斯韦对法拉第的物理观念很有兴趣,而在汤姆孙对静电学的'史诗般描述'中,汤姆孙把热现象和电现象作了类比。麦克斯韦设想:静电学方程和热流方程的数学类似可以用来描述电学的流体力学类比,也可用于法拉第的力线概念的一种物理类比。麦克斯韦对物理类比方法十分熟悉,表明他受到苏格兰'常识'哲学的深刻影响,亦即受到他在爱丁堡大学哲学教育中的明显影响。包括麦克斯韦的爱丁堡教授威廉·哈密顿(William Hamilton)在内的苏格兰哲学家,都很重视包括比较法在内的对知识的抽象主义的理念,这种观点在麦克斯韦讨论物理和数学类比的过程中得到了明显的反映。[资料来源:詹姆斯·克拉克·麦克斯韦给威廉·汤姆孙(后称开尔文勋爵)的信,1855 年 9 月 13 日,(Add 7342/M91/,剑桥大学图书馆),承蒙剑桥大学图书馆管理委员会的慷慨许可而复制。]

麦克斯韦的场理论

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(1831 年—1879 年)的工作,是发展法拉第的物理场理论的最系统的研究工作。在他的"论电学和磁学"的论文中,麦克斯韦明确地指出:他已经把法拉第的观念转译为数学的形式,但是法拉第和麦克斯韦之间的关系,不能简单地看作为由数学方法引起的概念创新。在为法拉第的物理观念建立数学表示式的过程中,麦克斯韦修正了法拉第的概念,系统地形成了场的物理模型和数学模型,这些模型又提出了更广泛的物理理论,也具有更深刻的概念洞察力,使人们对由法拉第观念提出的问题在概念上的认识更加深刻。法拉第利用周围媒质连续粒子的作用和物理力线理论,提出了场的另一种表述方式,麦克斯韦对这两种方式都作了改进提高和深刻的数学分析和概念分析。当汤姆孙提出把以太连续体的理论发展成为法拉第力媒体的物理化身时,麦克斯韦研究了力线的几何涵义,他还发展了以太粒子的物理模型,用连续以太粒子来表述场作用的传播机制。麦克斯韦遵循了汤姆孙的数学和物理概念,注意到汤姆孙用分子涡旋的转动去表示场的物理构造,在其设法对法拉第的物理观念进行描述时,采用了汤姆孙引进的模型和办法。麦克斯韦提出了一系列的模型,为了克服以往建立模型时的困难和不足,他又发展了一系列理论,所有这一切都为深刻理解法拉第提出的基本概念问题奠定了基础:场中力的传递方式和形成场结构的物质材料的性质之间的关系。

麦克斯韦在哲学上极其成熟,从他发表在 1856 年的"论法拉第的力线"那篇最初的场论论文中已经可以明显地看到这一点。他对法拉第和汤姆孙的观念的介绍,也是对场论的最早探索,从他在 1854 年—1855 年间给汤姆孙的信件中都能看出这一点。很显然,由于麦克斯韦本人对几何学的兴趣,他对法拉第的力线理论特别着

迷。麦克斯韦想到法拉第的力线概念可以作为场结构的纯几何描述来使用。麦克斯韦也对汤姆孙早期论述热电现象间的几何相似性的文章很感兴趣。正如麦克斯韦所描述的那样,汤姆孙对静电学的"史诗般的描述",为力线理论提供了范例。麦克斯韦提议进一步发展力线的几何描述,这是一种既可以用于热现象又可以用于电现象的描述,但只能作为一种关于线和面的"纯几何学真理的集合"的命题框架而已。麦克斯韦希望重视数学描述和物理描述之间的差异,他也希望指出对自然界作数学描述的物理含义所在。

在他的"论法拉第的力线"一文中,麦克斯韦精心建立了场的一种'几何模型',力在场中作用的方向由分布在空中的力线来描述。为了解释力的强度,他假定不可压缩的流体限制在力线形成的管子里流动。他指出,这并不是场的物理描述;流体也不是'一种假设的流体','只是一种想象性质的集合'。他用流体流动的几何模型去表示'形象化的数学观念',这是一种'物理类比'的表述方式。虽然流体流动的概念是通过对热流和电力流的数学比较后提出来的,但这种几何描述并没有物理假设的根据,它的使用完全在于'数学的相似性',它的高度解析形式的优点在于线、面和管的几何模型,为力线提出了一种本质性的描述方法,使得对现象的解释十分明白。流体流动、热流、电流之间的数学类似性只说明它们之间具有数学相似性,并不表示物理相似,亦即相似只是数学关系间的相似,并不是指现象之间的密切相关。

在采纳法拉第的力线至上理论时,麦克斯韦注重把法拉第的力线观念用作场中力的空间分布的几何表述,而不是用作场的物理表述的实用性。他在起草一篇文章时觉察到,'法拉第把力的空间分布作为初级现象来处理,并且也不坚持关于力心性质的任何理论,这些力具有普遍性但并非总是围绕力心分布的'。虽然他用力线来描述场,但他并不同意法拉第把场画成力媒体的方式来对力线进行物理解释,场理论的基础是法拉第的关于空间充满力的物质概念。

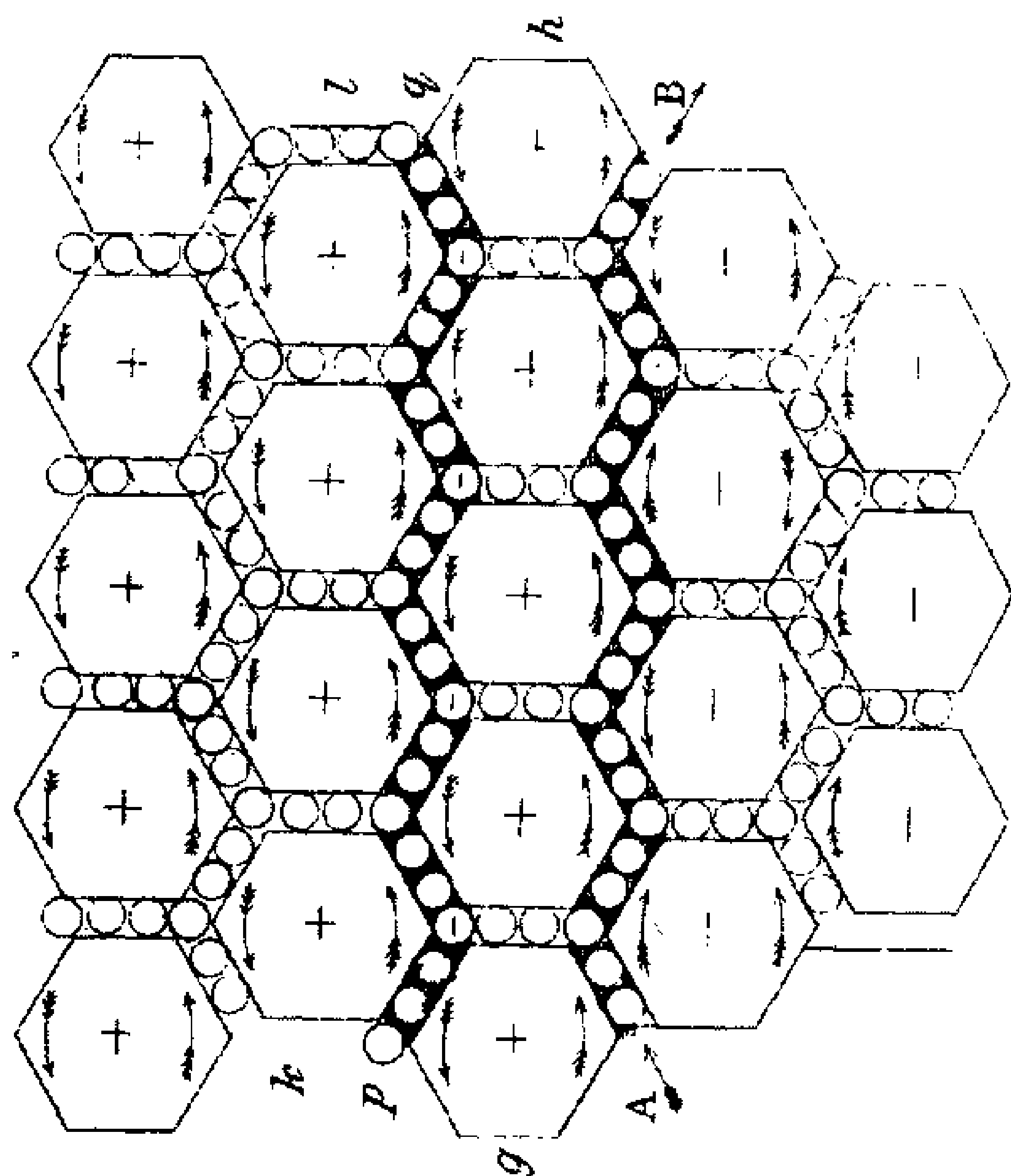


图 4.4　麦克斯韦关于分子涡旋和电粒子的物理模型(1861 年)。在以太的这种模型里,麦克斯韦假定涡旋的框架镶嵌在一种不可压缩的流体中。各涡旋之间由一层球状粒子彼此隔开,并使相邻涡旋的转动方向相反、这些'惰轮'粒子具有相同的电性质。电流方向从 A 到 B,AB 之上的一层涡旋 *gh* 的运动方向为逆时针方向,设为(+),紧邻粒子层 *pq* 的作用是与下一层涡旋 *kl* 齿合的、电作用的传播是借助涡旋的转动角速度从场的一个部分到另一个部分的传播过程来解释的。惰轮粒子(电)允许紧邻涡旋沿相同方向转动。图中也有画错的:AB 之下的涡旋沿顺时针方向(-)转动,但箭头的方向却画得不全正确。

麦克斯韦在文章中觉察到,法拉第涉及到的力线属于物体的材料物质,但他不认为这个观点对法拉第的场论是本质性的。对麦克斯韦来说,由法拉第阐明的力线理论描述了场的几何结构,表明了力的空间分布、方向和强度,而不是说明法拉第把场的物理结构设想为一种力的媒体。

从麦克斯韦在1857年给法拉第的信中,可以看到麦克斯韦力线理论的几何核心所在,在这封信中,他讨论了把力线的概念推广到解释引力的可能性。这是法拉第思想在几何学上的一种形象化表述,决不是引起麦克斯韦对他的概念发生兴趣的物理基础。'从太阳向四面八方发出力线,如果力线是可见的话,那末当力线接近一颗行星时,力线就会发生弯曲,使得每颗行星,视其本身质量的差别,在力线传播过程中发生不同程度的偏转,并且每颗行星相当于一个取代自身的系统,因此就有点像彗星'。正如力线所描述的那样,场的几何模型是以绝对空间的假设为前提的。对麦克斯韦来说,绝对空间的概念是建立物质实体之间关系的根基。空间的结构并不是由场的分布所决定的;由力线从几何角度描述的场当然是处在空间里的,空间才是一种根本的本体类型,亦即空间是场存在的条件。根据麦克斯韦的看法,场的物理表述,正如他在"论法拉第的力线"一文所指出的那样,要求场符合一种'力学观念';正是在这篇文章中,他研究利用弹性固体的定律,以及利用汤姆孙1847年论弹性固体中的应变一文作为电、磁作用的模型,他设想法拉第的

图 4.4(续)

麦克斯韦强调这种惰轮粒子的模型只是暂时性使用的。但不管怎么说,他一直致力于论证:磁光偏转意味着涡旋的转动代表着物理的实在。1861年时,场的这一力学结构只是作为一种启发性的说明,并不是作为玻耳兹曼后来所发明的那种活生生的力学器械(麦克斯韦自己也同样认为),这种器械为电磁现象提供了特别的力学类比(见图6.1)。[资料来源:《詹姆斯·克拉克·麦克斯韦科学论文集》,W·D·Niven主编,2卷(Cambridge,1890),1:488,Pl.Ⅷ,fig 2]

电振奋状态的概念就相当于它的力学表述。从麦克斯韦在 1857 年给法拉第的信中可以看到，这段时间里，他已经从汤姆孙利用分子涡旋转动来解释磁光偏转的道理中领悟到对场的物理表述是可能的，他还提醒法拉第注意汤姆孙的工作，指出这一理论看来可以为'证明磁力线的物理性质'提供成功的基础。在麦克斯韦看来，场的物理表述需要以场为基石来建立周围以太的理论。

从这些论述过程中可以料想到，麦克斯韦所关注的问题从他的题为"论力线"(1861 年—1862 年)的文章中可以看得很清楚。在这篇文章中，他从'力学观点'出发，从讨论力线的物理几何入手，再处理电磁场问题。他用'电磁介质'的应变来阐述电、磁力传播的系统理论。他假定磁场可以被描述为填充着转动涡流管的流体，涡流管的几何排列相当于力线，涡流旋转的角速度相应于场的强度。为了解释涡旋绕平行轴并沿相同方向的转动，他提出了一种机械比拟：一台机器，两个轮子间还装上一个'惰轮'，两个主轮的转动方向相同。根据这个比拟，他提出起惰轮作用的一层分子嵌在相邻的两个涡旋之间，使每一个涡旋的转动都引起相邻的涡旋沿同一方向旋转。麦克斯韦用画出来像蜂窝的蜂窝状以太来表示'电磁介质'。由一层'惰轮'粒子围着的分子涡旋组成一个单元，一旦相邻涡旋的角速度不同，惰轮粒子可以承担运动的传递，而且这些粒子的运动相应于不均匀磁场中的电流。因此机械模型能说明电磁之间的关联，并能提供电磁感应的描述。涡流模型被用于力线的物理表述，麦克斯韦抛弃了早先在论文中提出的形象化几何描述。麦克斯韦利用法拉第的电振奋状态的概念对力线作物理表述，并用涡旋的转动角动量对电振奋状态作出力学解释。

麦克斯韦一直强调指出，他的惰轮粒子模型和蜂窝以太模型只是'临时性'的假设。承认这一模型的确'不太好理解'，虽然他提出的以太模型并不表示'自然界中存在的一种实在的联系模式'，在他作了这样的假设之后就明白了：'力学上构想'的模型只能说

明对场的力学解释的可能性。在1867年给泰特的信中，他觉察到他所建立的以太模型只是表明现在可以用一种力学机制加以解释。机制的性质同真正机制的关系，就像太阳系仪对太阳系的关系。为了说明他的力学表述所需要的论点的合理性，麦克斯韦始终围绕着磁光效应，正如他在论文中觉察到的那样，这一效应指出："某些转动现象确在磁场中发生着"，因此，这些转动现象需要某种机制来加以解释，尽管分子涡旋的假设还只是一种启发性的和解释性的事例而已。

麦克斯韦对他的以太模型的尝试性、解释性的地位的反思，只是打算作为论文的结论部分提出来，能否将他的理论推广到静电学、电磁理论等方面则没有说。并且转动如何从惰轮粒子传播到蜂窝状涡旋的机制也不清楚。对这些问题的进一步深入思考导致麦克斯韦对'物理学力线'理论作了精心的研究，因此又使得光学和电磁学达到了料想不到的统一。麦克斯韦提出以太的蜂窝单元是具有弹性的，它同惰轮粒子发生弹性相互作用。'电-磁介质'分成为一个个单元，分隔各单元的隔离层为一层粒子层，粒子的运动相当于电流，这些电粒子的运动会扰乱某个单元并进一步引起一个方向相反、大小相等的起因于各单元产生弹性的力。

正如从麦克斯韦早期的模型中看到的，以太的力学结构具有电学的对应物。单元的弹性畸变作为畸变的对应物，会引起一种所谓的表示电-磁介质粒子"极化单元里的电位移"。电"位移"和麦克斯韦电磁方程组的结合，使电学方程和磁学方程间出现了对称关系。被选作为表述电介质极化的概念完全满足蜂窝状单元的以太模型，但它在麦克斯韦的电磁学方程中却是模糊不清的，它的正确性也是有争议的。不管如何，通过推广法拉第的粒子以太的力学表述，亦即发展法拉第的电振奋状态概念和以太媒质连续部分的作用机制，并以力学表述代替力线的几何形象表述，麦克斯韦解决了如何建立场的物理理论的问题。由于从力学上讲，力场是由力在以太

图 4.5　麦克斯韦写给泰特的明信片(1871 年和 1874 年)。泰特是麦克斯韦在爱丁堡的同辈人和最密切的学术朋友。在他们的互相通信中,麦克斯韦和两位“北方奇才”(麦克斯韦语),他的苏格兰同事 W·汤姆孙和泰特,共同撰写“论自然哲学”,文中用了他们名字的缩写字母。汤姆孙为 T,泰特为 T',麦克斯韦则变为 dp/dt,在泰特的《热力学概要》一书(1868 年)中,有一个方程写成为 $dp/dt = JCM$。这个方程描述热力学第二定律,很可能是泰特精心设计的很值得研究的一段趣闻:利用(麦克斯韦发明的)这些符号,他给他的朋友都起了一个热力学的名字。

粒子间的传递的理论描述，场的物理理论也是一种"力线"的物理理论。

磁电介质的弹性假设使理论可以推广到静电学，而力学以太的弹性应力相当于静电场，因此使麦克斯韦的理论成为综合性的力学场论。理论产生了意外的含义。麦克斯韦计算出的弹性横波传播的速度相当于磁电介质中电位移的传播速度，而且发现横向弹性波与光波以同样的速度传播。他的结论是："我们很难回避这样的推断：光是由引起电磁现象的同种介质的横向振动组成的。"电磁介质和发光介质的恒同性是以太理论重大进展的结果。麦克斯韦已经建立了一种具有光学-电磁学关联的以太力学理论。以太的力学理论确立了光学与电磁学的统一，这是通过用分子涡旋理论来处理磁-光转动的途径实现的。考虑到光学和电磁学的统一，以及对磁-光转动的解释，麦克斯韦对以太的物理真实性的信心越来越高。

从麦克斯韦在1865年发表的"电磁场的动力学理论"一文中，可以发现他对他的场的力学模型情有独钟，这篇文章是根据格林和

图 4.5(续)

在这两张明信片的头一封中，麦克斯韦告诉泰特，亥姆霍兹1847年说韦伯的力定律违背了能量守恒定律是不对的。在论场论的论文中，麦克斯韦支持了亥姆霍兹的论点，泰特在其《热力学概要》一书中也重述了亥姆霍兹的论证。麦克斯韦承认亥姆霍兹对韦伯的力定律的批判是对的，这也是他在"论电磁学"一文中一再坚持的立场。

第二张明信片是为了回答泰特对B·黎曼论非欧几里德几何论文的质疑而写的，当时黎曼的论文已由W·K·克里福德(William Kingdon Clifford,1845年—1879年)译成英文并刊登在1873年的《自然》杂志上。信中指出，他不同意黎曼的看法，他指出理论上关于坐标的定义问题，他不同意采用"空间弯曲"的所谓空间扭曲的概念。拉丁语圆滑两字是从贺拉斯(Horace)那里借用的。麦克斯韦相信绝对空间的概念，他认为场处在空间之中，而不应当用力线扭曲去定义空间弯曲的几何结构。[资料来源：1871年11月7日、1874年11月11日麦克斯韦给P·G·泰特的明信片.(Add 7655/Ib/36和72,剑桥大学图书馆),经剑桥大学图书馆管理委员会的许可而得到复制。]

麦克考拉夫在他们的以太动力论中所用的分析力学的论述方法，并不是建立描述以太结构的特殊力学模型。从他对'光的电磁理论'的表述中，可以看到他的立论发生了变化。虽然文中波动方程是从电磁规律导出，麦克斯韦也放弃了说明以太力学结构的努力，但波赖以传播的以太仍然被认为是服从动力学定律的。

在建立以太力学模型的程序中也遇到了两个根本性的困难。尽管麦克斯韦在提出分子涡旋的力学解释中注意到了惰轮模型的启发性价值，但也出现了假设同实际相混淆的危机，假设本身也没有被从假设得出的结论所证实。此外，作为假设所可能提出的力学模型的数目原则上也没有任何限制。麦克斯韦在论文中对这一问题表述得特别清楚："为了在系统各部分运动之间建立起某种给定类型的联系而需要确定有关的机制问题，常常允许有无数种解答"。因此，他提议抛弃蜂窝状以太的力学对比，而场的物理理论的确立可能同任何特殊的力学模型都无关。不过场的物理表述的公式，无论如何也会受到力学解释纲领的制约，因为麦克斯韦的电磁场的动力学理论，是在假定电磁现象是由物质粒子运动产生的前提下建立的，场的作用是经由"多种多样运动的复杂机制"来实现传播的。在放弃任何努力去精心建立描述这一机制的特殊模型的同时，他持续采用力学的术语、电磁量的力学关联因素，诚然这种应用也只是'解说性的'，而不是'解释性的'，但是场论的动力学框架却更加突出了。

在麦克斯韦强调场的储能功能后，动力学的框架更为明晰了。论证了能量只有同材料物质联系才能存在后，麦克斯韦得到的结论是：构成电磁场的以太介质是场的能量仓库。以太的复杂机制符合动力学定律，场在动力学上可表述为以太中的能量传输。而电磁量的力学相关量的使用只是提示性的，麦克斯韦注意到，"在寻找场的能量时，我希望只从字义上去理解"。由于"所有的能量都是同样的机械能"，电磁现象的能量就涉及到以太各组成部分运动的动

能及储存在与以太的力学结构内相关的势能，而以太的运动机制则服从普遍的动力学定律。电磁波的传播被设想为能量在以太中的传播。

在“论电学和磁学”（1873 年）的论文中，麦克斯韦采用了由汤姆孙和泰特在“论自然哲学”（1867 年）一文中提出的分析力学公式，推广了电磁学的动力学解释。他以“不损害动力学思想的”方式，即采用不涉及动量、速度和能量等概念的纯数学形式，使这些量由广义运动方程中的符号来代换，把拉格朗日方法用于建立广义运动方程。因此，麦克斯韦步汤姆孙和泰特的后尘，旨在寻找“培育我们的动力学观念”。在冲力概念基础上通过数学论证，这一方法“脱离了系统各部分之间相互联系的机制”，同时又能“时时牢记动力学科学的基本观念”，因为动力学概念对于物理实在的描述是适当的。尽管数学形式的动力学基础必须时时牢记，但从方法上讲，回避了电磁场同力学联系的具体做法。这就满足了麦克斯韦的所谓在物理中承认数学方法的重要性：任何数学形式都必须在节骨眼上使物理问题显得十分清晰。正如他利用流体流动的“物理类比”去描述力线的空间分布那样，这里流体流动的几何模型已成为力线的物理化身了，麦克斯韦关于场的动力学理论注重数学形式和所描述的物理实在之间的联系，因此，“我们既要牢记动力学真理，还要有数学方法的武装”。

麦克斯韦强调汤姆孙和泰特曾赋予能量守恒原理以动力学的抽象地位。他论证后指出，场由动力学系统的结构和运动来描述，并且根据汤姆孙和泰特的看法，场的能量不需要涉及到该动力学系统的内含结构就可以加以明确的阐述。场是系统内相邻各部分之间的彼此作用传递的一种物质运动的结构。磁光效应指出，场是由材料的物质结构构成的，而这种结构的各组成部分又会产生相对转动，不过转动机制的性质则不必考虑。麦克斯韦指出，他假定场是一种运动的系统，“因为根据拉格朗日确定的方法，对于任何连续

的体系，我们都可以在运动方程中消去力，因此虽然力使得运动从体系的一个部分传递到另一个部分，但是我们甚至根本就不需要定义力的性质和定律。”虽然体系的结构和运动的变化都会引起作用力的传递，系统不同部分之间的相互作用力却不明确，场的力学结构也不必专门阐述。

然而，不管这一方法的威力如何大，麦克斯韦甚至还强调了“动力学真理”：形式是很富想象的，甚至整个代数形式的枯燥无味都可以避免，麦克斯韦当然对这一力学解释模式仍然不满意。他指出，根据论文中的论点，电作用是“一种由未知原因引起的现象，它只服从动力学的普遍定律”，但是电磁场的“完全动力学理论”应当能够描述构成场的材料体系的隐含结构，因此“运动的整个中介机制和细节都应当作为研究的课题”，尽管他意识到，建立描述场的力学以太模型可能有很多很多种。他希望得到场的一个“完整的”理论，以便可以使力学模型完全符合物理实在。

英国物理学的以太和场(1880 年—1900 年)

麦克斯韦在 19 世纪 70 年代后期的论著中，开始采用汤姆孙的涡旋原子论的术语去理解以太结构的含义。麦克斯韦注意到涡旋原子论的基本假设具有一个很明显的优点——简洁。无须再作更多的进一步假设，只要不可压缩的普通媒体的惯性、密度、和流动性就足以确定涡旋原子的性质。麦克斯韦一贯强调指出，磁光转动现象表明以太具有分子结构，但在 19 世纪 70 年代后期，他认为以太中的分子涡旋在以太连续体中的分布可能是不连续的，而连续以太的结构却具有弹性体的特性。

这些论述指出，麦克斯韦的电磁场理论和汤姆孙的以太媒体的概念很可能就是同一件事。涡旋原子论作为一种物质论而引起人们的兴趣始终不衰，作为力传播媒体考虑的场只能由以太连续体

(而不是由连续的以太粒子)间的作用才能给以描述。在约瑟夫·琼·汤姆孙(Joseph John Thomson,1856年—1940年)于1883年发表的"论涡旋环的运动"一文中,他注意到涡旋线的原子论才是一种协调的原子论,而在论场论的著述中他所提出的力线或力管的理论却还要再加上关于场的物质结构的假设,当然力线或力管的理论比起以太的粒子理论来又要更接近于最终的物理实在。琼·亨利·巴印廷(John Henry Poynting,1852年—1914年)却采用力线在空间的分布和力线之间的能量通量,而不是用以太模型,去描述场。电磁场被设想为均匀的媒体,电磁现象则由力线的分布加以解释。

乔治·弗朗西斯·菲茨杰拉德(George Francis Fitzgerald, 1857年—1901年)在一篇题为"论光的反射和折射的电磁理论"(1880年)的论文中,提出了一种将以太媒体同麦克斯韦的光的电磁理论相统一的理论。不过麦克斯韦已经把电磁变量同以太的材料结构联系了起来,菲茨杰拉德赋予以太以纯粹的电磁性质。他又重温了他的同事艾丽舒曼·麦克考拉夫在1839年提出的转动刚性以太的思想,建立了麦克考拉夫的光以太理论和电磁学的对应关系。麦克考拉夫的刚性固体的转动由麦克斯韦的电"位移"给予描述,以太流的速度则由磁力来描述。利用这一电磁对比关系,菲茨杰拉德证明麦克斯韦的理论适用于解决光的反射和折射的问题。但麦克斯韦则强调指出,为了解释磁光转动,只有假设以太的材料在运动,菲茨杰拉德希望"我们的思想能从材料以太的奴役下解放出来",因此不要以以太运动为出发点,只要说明以太运动的电磁性质即可。在此后的论文中,菲茨杰拉德提出了所谓的以太和物质都可以用宇宙媒体中的涡旋运动来阐释的理论。物质是闭合涡旋环的一种结构,而以太则被想象为延伸到空中的涡旋形细丝。涡旋细丝的缠绕和起伏引起了电磁力的传播,这便满足了由涡旋以太来解释场的物理结构的程序。菲茨杰拉德在1885年提出一个由轮子和皮带构成的力学以太模型,这仅仅是为了说明用机械的手段可以描述以太和物

质之间的互相联系，这个模型只对以太应力作出了力学解释，并不是对物理实在作出解释。菲茨杰拉德喜欢采用媒体中涡旋运动而不是采用以太的弹性固体理论去描述以太和物质的关系；以太的弹性固体理论，是一种把以太当作“四处迷漫的与物质粘在一起的果子冻，物质很像果子冻中浸着的葡萄”。正如菲茨杰拉德注意到的那样，为了解释磁光转动，重要的问题是如何解释以太与物质相互作用，“果子冻的性质不利于我们解释假定其元素的持续（无摩擦）的转动”。

W·汤姆孙在 1884 年作的演讲中［后来发表在著作《关于分子动力学和光的波动说的巴尔的摩讲演集》（1904 年）中］，又着意提出了另一种方法去讨论以太连续体的理论。正如 19 世纪 50 年代时的情况那样，汤姆孙所面临的主要问题是如何对物质和以太间的关系作出解释，他试图讨论光学现象与以太的弹性固体理论间的关系。麦克斯韦阐明，光的电磁理论表明任何代表场的以太介质都只能传递横波，因此以太介质具有弹性固体（而不是流体媒体的涡旋）的性质。此外，汤姆孙发现，很难解释由涡旋组成的弹性以太的稳定性，因此他抛弃了涡旋原子的理论。他企图建立起一种包括以太、电磁学和光的波动说在内的所谓“全面的动力学”。他考虑到一种单纯的光的电磁学理论也不可取，强烈地代之以在“普通物质的实际动力学和真正的弹性体”基础上建立一种理论，这种理论又能与光的波动说完全协调一致。汤姆孙强调指出，他的弹性固体以太的模型只是解说性而已，我们所能说的，只是在光波传播过程中以太的行为很像弹性固体。

中心问题是汤姆孙对以太和物质相互关系的阐述。他证明，光学现象是很难用弹性固体发光以太的力学性质来解释清楚的。为了解释这些现象，他提出了一种以太粒子的“分子”动力学，这是用所谓的“粗糙力学”模型去解释弹性固体以太和物质粒子结构之间的关系，并进一步探索物质粒子对以太作用的方式。他认为以太是

一种“连续而均匀的”、布满全空间的弹性固体,他试图研究以太和物质粒子间“弹性粘连”部分的性质。取代他的以太媒体的涡旋原子论,他研究了连续弹性固体以太同物质分子间的相互作用。他用由与刚性同心球壳相连的弹簧来表示物质粒子在以太里振动的模型,来阐述光的色散现象。磁光转动现象则是由假定的陀螺分子在以太中的转动给予解释的。

汤姆孙是在19世纪80年代后期所写的论文中根据转动的弹性以太提出这些想法的,他精心建立他的陀螺模型,讨论弹性固体以太、电磁学和物质结构之间的相互关系。为了解释以太的弹性系数,他将以太设想为一种有点如陀螺仪的所谓蜂窝状结构,以太的转动弹性系数由陀螺仪的转动惯量来说明。但光的波动说和电磁学指出,弹性以太要发生畸变,磁光效应指出以太是旋转的,这一性质用流体的涡旋来表述是最为恰当的。汤姆孙打算用陀螺仪以太去统一弹性固体和转动弹性以太的模型,并由此计划解决这一困难。但是全面的以太动力学却使他十分为难。虽然涡旋原子论提出的一种模型把场作为力的媒介,这种模型也能描述以太同物质的相互作用,但不能满足光的电磁理论。弹性固体以太理论的力学模型不能解释以太的力学性质同物质的“分子”动力学两者间的关系。

在试图解决如何建立起能够描述一切光学和电磁学现象的以太理论的过程中,约瑟夫·拉莫尔(Joseph Larmor,1857年—1942年)发表了他的系统而全面的“电介质和发光介质的动力学理论”(1893年—1897年)。J·J·汤姆孙为皇家学会对论文的头一部分作出评价后指出,这是一种“普适的物理学理论”,也是拉莫尔博大精深的里程碑式工作的反映。拉莫尔指出,以太可以由均匀的流体介质来描述,如果说以太具有转动弹性系统的特性,那也只是潜在的并且只可能由以太介质的单元间的移位来表述。为了描述以太的转动弹性系数,他采用了汤姆孙的自转陀螺的力学模型。拉莫尔证

明，除非以太经历弹性畸变，用均匀流体介质足以描述以太。这样，他的以太模型包括和综合了麦克考拉夫的转动弹性以太（这也是菲茨杰拉德已经将其转变为电磁以太理论）、W·汤姆孙的将物质设想为在原生流体介质中的涡旋环、以及汤姆孙的由陀螺仪转动来表示的以太介质的弹性等模型。拉莫尔的以太具有完全不可压缩的弹性流体的特性，因此它是可以传播横向振动的介质。

拉莫尔的流体和转动弹性以太的物理模型只是作为以太的一种"行为描述"，这只是严格意义上的一种示意性的启发性模型。根据麦克斯韦的想法，拉莫尔之所以强调动力学的拉格朗日形式，完全是因为只有这样才允许忽略以太机制的细节。他的理论是建立在说明能量在场中如何分布的解析函数的基础上的。拉莫尔始终认为，拉格朗日形式足以解释物理的实在，因为它"自身实际上包容了整个问题的解答"。对以太所了解的一切，都可以用确定连续介质特性的微分方程来表示。他指出，他的主要论证都与转动以太的模型无关，他也感到这种假设很有启发性的价值，它为我们从物理上了解数学形式提供了范例。

拉莫尔注意到流体以太的弹性传递不同于普通材料物质的弹性传递。他的以太是一种"纯粹的连续体"，具有弹性和惯性，而运动的连续性是作为它的"最后的、最基本的唯一性质"，不过普通物质是由具有惯性的分立原子所组成；因此，普通物质的弹性是由分立粒子的相互作用和分布状况决定的。以太的性质并不能用以太粒子的构型和相互作用来表示，但是能用均匀流体媒介的弹性来描述。采用涡旋原子论的前提下，拉莫尔认为以太是一种原生的媒体，而物质被设想为以太中的涡旋结构。重温他在《以太和物质》（1900 年）中所指出的理论时，他认识到"物质不单可能而且很可能是以太中的一种结构，但是以太却不是由物质组成的结构"。以太在物理上"比物质更加原始，因此不能用物质来表示以太"。物质最基本的单元就是涡旋以太中的转动应力中心，拉莫尔假定这些应

力中心都具有电荷，并称它们为“电子”。电子是“到处充满的均匀介质中，最终不变的唯一奇点”。根据物质的电子论，原子由电子的集结来描述，电子处在稳定的轨道上彼此环绕着运动。电子是以太中转动应力的核心，它在以太中永远存在，就像涡旋环在理想流体中稳定不变地存在一样。

拉莫尔的以太连续体理论，在物理场论中解决了两个基本的问题；一是在场的作用传播过程中以太同物质的关系问题，二是以太和电磁场的力学性质之间的相互关系问题。场的作用是通过转动着的弹性连续体来传播的，物质同以太间的相互作用则由物质论加以解释，物质处在以太的转动应力中心。这是一种场的动力学理论，根据这种理论，以太的基本性质是惯性和弹性；以太的作用方式是通过拉格朗日动力学的解析形式表示的。场的电磁学性质由电子论加以解释，电子是以太媒体中的转动中心，具有惯性和弹性等基本性质，电子又是电磁学的最终实体。拉莫尔的以太媒体理论，将电磁学性质和以太的动力学性质统一了起来，因此综合地反映了各种各样的英国以太理论和场论。

德国物理学的力和以太理论

19世纪英国物理学家发展起来的场论和以太理论，同库仑和拉普拉斯所设想的电学理论形式，存在着根本的差异，后者所确立的电力数学理论，类似于重力的中心力定律。采用中介的以太或场是为了解释电磁现象，英国物理学家对数学和力学的以太模型的细致阐述改变了电科学的理论基础。在德国，也出现不太关键但很明显地脱离电学的中心力理论。威尔亥姆·爱德伍德·韦伯（Wilhelm Eduard Weber，1804年—1891年）为了用基本的力定律去统一电磁现象，他用发展起来的粒子性的电磁以太理论作为统一电磁学现象和光学现象的手段。

韦伯的《电动力学测量》(1846 年)一书介绍了不同于传统的电学中心力理论。韦伯的电流体粒子间的超距作用力定律包含了这样几项:两个电粒子的力不仅取决于它们间的距离平方的倒数(正如库仑的静电力定律),还取决于它们的相对速度和加速度。韦伯证明,对传统的中心力理论作这样的修正是恰当的,坚信他的力定律只是一种电力的数学表示,修正后的理论满足不随运动而变的力定律。韦伯的力定律并没有对电力作出解释,只是表示力的一种定量的量。尽管韦伯把对自然的数学表述和对物理实在的表述区别了开来,并且还清楚说明:由于他相信电力是通过类似于发光以太这样的中介媒体来传播的,因此他对中心力概念的修正是恰当的。韦伯指出,在他的心目中始终萦绕着安培的电以太迷漫全空间的理论,假定电以太由正负两种电流体组成,电流体密布在普通物质分子的周围。因此韦伯力定律的附加项由正、负电流体之间的相互作用得到解释,同速度、加速度有关的附加项,修正了电磁力和电动势引起的静电力的平方反比律。韦伯评论说,他认为光的波动说应当用电以太的振荡来解释,他还用电以太的旋转去解释磁光效应。

因此,以太的物理学理论补充了韦伯的数学上的力定律。高斯对韦伯工作的反应是:他相信还需要说明电力传播的所谓"结构性描述"的理由。尽管韦伯和高斯都注意到数学形式同它的物理载体无关,韦伯特别赞同在电以太基础上建立起统一的物理学。早在 19 世纪 50 年代和 60 年代,他就对这个理论作了进一步的改进,使他的力概念与传统的中心力理论有着重大的差别。根据韦伯理论,力并不是简单地从一个粒子作用到另一个粒子上,而是两个粒子连在一起形成一种"原子对",力就是两个粒子间这种关系的化身。

韦伯在 1871 年发表的文章中,打算把他的力定律同能量的概念联系起来,他把两个原子之间的力用"原子对"的势能来表示。亥姆霍兹于 1847 年对他的力定律提出批评时指出:在静电力定律中假设的与时间相关的项中,韦伯的定律违背了能量守恒原理。韦

伯一直到1869年还未对亥姆霍兹的批评作出答复,随着时间的拖延,批评的影响不断扩大,到了19世纪70年代作答时,麦克斯韦早已考虑到亥姆霍兹对韦伯力定律的批评意见,他的论证是否定在中心力的基础上建立起来的任何电磁理论,那怕是修正过的电磁理论。韦伯在回应亥姆霍兹的论证时指出:当能量守恒定律的概念应用到电动力学理论时,需要加以修正。他发展了一种电的自然观,这种自然观满足化学亲和力、气体理论以及发光以太,因此是一种电粒子的统一理论。他论证指出,电原子对的形成方式,既可以像粒子也可能不像粒子。普通的物质是由紧密束缚在一起的负粒子组成的,而以太是由带正电的粒子对疏松地结合起来的。化学的结合由负粒子的分布给以解释,物质的性质则取决于这些粒子和电以太的联结性质。电以太的振动解释了光波的传播即能量的转移。

韦伯对中心力概念和他的电以太物理理论的修正,使他提出了力如何在空中传播的理论建议。在19世纪60年代发表的若干篇论文中,探讨了从数学上描述电磁力传播的可能性问题。伯恩哈德·黎曼(Bernhard Riemann,1826年—1866年),描述了电的传播并不是即时完成的,这不是所谓的中心力理论,而是以光的速度在发光以太中传播的。丹麦物理学家路德维希·洛伦茨(Ludwig Lorenz,1829年—1891年)受奥斯特的影响,强调物理现象是统一的。洛伦茨指出电力是以光速传播的,他还得到光的振动产生电流的结论。在对电力传播作出数学描述时,他用场方程来说明力的传播,认为场中的力传播是场的紧邻单元之间的物质所产生的一种作用。麦克斯韦认为洛伦茨的理论,从形式上看类似于他自己的电磁学理论和他的光电磁理论。洛伦茨认为光是一种电的转动振动,而场则作为经受振动的一种材料载体。卡尔·纽曼(Carl Neumann,1832年—1925年)解释了同能量传输有关的电作用的传播。正如麦克斯韦所观测到的那样,这种理论并没有打算要采用"赖以发生传播的介质的概念",对能量的传输作出"自恰的(创造性的)描述"。虽然这些理论

（这些理论有利于电作用传播与时间相关的假说，也有利于环境的场起中介作用的假说）与电学的中心力理论有很大的差别，他们的确不同于英国物理学家所发展起来的动力学解释。他们提出的以太的数学和力学模型是作为场的材料载体出现的。

这些进展都是在将场的概念引入到英国物理学的过程中独立地取得的，但在1870年发表的一篇论电动力学理论的很有影响的文章中，亥姆霍兹试图将麦克斯韦创立的光的电磁学理论和电动力学两者形式上一致的中心力理论合并起来，以便避免他相信业已对韦伯的电动力学的一致性构成威胁的概念歧义。亥姆霍兹还是一个劲地反对韦伯的理论，他仍然相信韦伯的与时间有关的力的定律不可能很好地满足能量守恒定律。黎曼、洛伦茨所提出的，并不是要用另外的理论去代替韦伯的理论，纽曼则同意亥姆霍兹的理论；在假定力如何传播的时候，这些理论都服从与时间相关的力定律。亥姆霍兹完全明白麦克斯韦的研究已提出了一种电磁现象的统一理论，而且麦克斯韦关于光的电磁理论是物理理论中的一次重大的概念创新。亥姆霍兹打算建立电动力学的超距作用理论，这种理论既符合他的能量物理，又能包容光传播的电磁理论而毋须引入与时间相关的力定律。

亥姆霍兹导出了描述电流之间即时超距相互作用的一个普遍公式，根据这一公式，电动力学的各个定律（如麦克斯韦和韦伯那样）都可以通过数学推导演绎出来。亥姆霍兹的公式并未引进速度相关力的定律，也就是没有对力作传播时间的假定。但是，通过引入限制条件，他导出了描述极化状态通过电、磁极化介质传播的波动方程。他建立的电磁传播的波动方程，并不是唯一地取决于麦克斯韦对场论所作的假设。他假定电磁介质在电磁力的影响下，介质的各个部分都要经历电、磁极化。物体的电相互作用，部分地取决于超距力的直接作用，部分地取决于介质的极化。超距力引起介质极化之间的相互作用力，极化介质传递的力则直接跨过各连续极化

部分之间的距离。根据这一理论，电磁力即时地传播于极化粒子间，并不是如麦克斯韦理论所说的以光速传递。

亥姆霍兹论证指出，光的电磁理论并不是完全取决于麦克斯韦理论，只要对广义力定律引入限制条件也可以导出这一理论，亦即通过传统的超距电作用假设也可以得出光的电磁理论。正是通过亥姆霍兹对光的电磁理论的修正，使欧洲大陆的物理学家熟悉了麦克斯韦的工作。麦克斯韦的文章公认是很难读懂的而且是模糊不清的，亥姆霍兹修正了麦克斯韦观念的无懈可击性，因之使他的理论易于理解了。在19世纪70年代，赫兹和H·A·洛伦兹根据亥姆霍兹的中心力理论的假设，得到了麦克斯韦关于光的电磁理论。把光的电磁理论归结为从他的广义力定律演绎而来的结果，亥姆霍兹已把光的电磁理论纳入到公认的电动力学理论的框架之中，当然，在这整个过程中，他从根本上改造了麦克斯韦理论的物理基础。

赫兹和电磁波

亥姆霍兹的论证对海因利希·鲁道夫·赫兹（Heinrich Rudolf Hertz，1857年—1894年）的工作产生了重大的影响。赫兹做过关于电磁波传播的著名实验，就是当赫兹还是亥姆霍兹的学生时根据亥姆霍兹所提出的问题设想的，这个实验检测了极化同电磁效应之间的关系。赫兹对场论的发展作出了两个重大贡献，一是直接验证了电磁波的传播；二是对麦克斯韦论文中的场方程的概念结构提出了严厉批评，并因此得出重建的麦克斯韦电磁学方程。在这两方面工作中，赫兹打算要解决的科学问题，其实都由亥姆霍兹早已提出来了，一方面是寻求对麦克斯韦的工作进行实验验证，另一方面是揭露麦克斯韦电磁理论的概念困难所在。

麦克斯韦在论文中列举支持他的电磁理论的证据时，主要是来自光学现象，强调他的公式推导是说明光的传播。他提出光的传播

是以电磁以太作为媒介的，显然没有注意到电磁波还有直接实验检测的可能性。电磁振动是以低于光频率的频率传播的，虽然文献中有过这方面的报道，但并没有引起麦克斯韦的兴趣。尽管产生电磁波的可能性是麦克斯韦理论中隐含的，菲茨杰拉德和奥列弗·洛奇(Oliver Lodge，1851 年—1940 年)都讨论过这一问题，赫兹之所要做这个实验，动力完全来自于亥姆霍兹。

赫兹之所以要从实验角度去维护麦克斯韦从理论思辩中发展起来的电磁理论，那是因为受到亥姆霍兹电理论的鼓舞。在 1884 年发表的论文中，他探索场与电动力学的中心力理论之间的关系，说明麦克斯韦关于电力传递的假设同已知的电动力学定律是一致的。但无论如何，正如麦克斯韦所做的那样，他拒绝采用关于电磁以太的物理假设，他只关心麦克斯韦关于电磁力传播在概念和形式上的协调一致性的关键所在。这篇文章对他后来的实验工作产生了特别重要的影响，他认为电磁力传播的证据应当在电磁现象中寻找，而不应该在光学现象中寻找。

1886 年 11 月，赫兹开始了一系列的实验研究，这些研究使他证实了电波在空气中的传播。他的头一批实验完全根据他在 1884 年所制定的战略——电作用的传播并不表示存在电磁以太——进行的。但到了 1888 年 2 月，当他把电磁波传播的重要文章送到柏林科学院时，电磁以太的概念对赫兹的论证来说已经变得十分重要了。他后来感到，假定弥散在空气中的物质和真空都会产生电磁极化，那么物质和真空的假设都是麦克斯韦的场理论的核心内容。他在文章的开头就指出，如果空气中也产生极化，那么"电磁作用必定以有限的速度传播"。电磁波的检测证明空气中的确有物质经受着电磁极化，这也证明了电磁以太理论是正确的，也就是说证明麦克斯韦场论的基本性质是对的。

在赫兹的一系列基本实验中，他向自己提出了检测到电磁波并测量出电磁波速度的任务。他利用与感应线圈相连的一根导线来

产生电波，并用一个小线圈来检测电磁波，小线圈有一空隙，一旦小线圈上出现感应电流，小空隙中可以产生火花。这一装置还使他能够测量出电波的波长，并根据算出的振荡频率，他得出的电波速度正好等于光速。赫兹也研究过光和电波之间的相似性，他用镜子来聚焦射线，说明射线通过光滑斜面的棱镜时会产生反射和折射，还用金属光栅去演示极化效应。他得到的结论是：这些实验说明

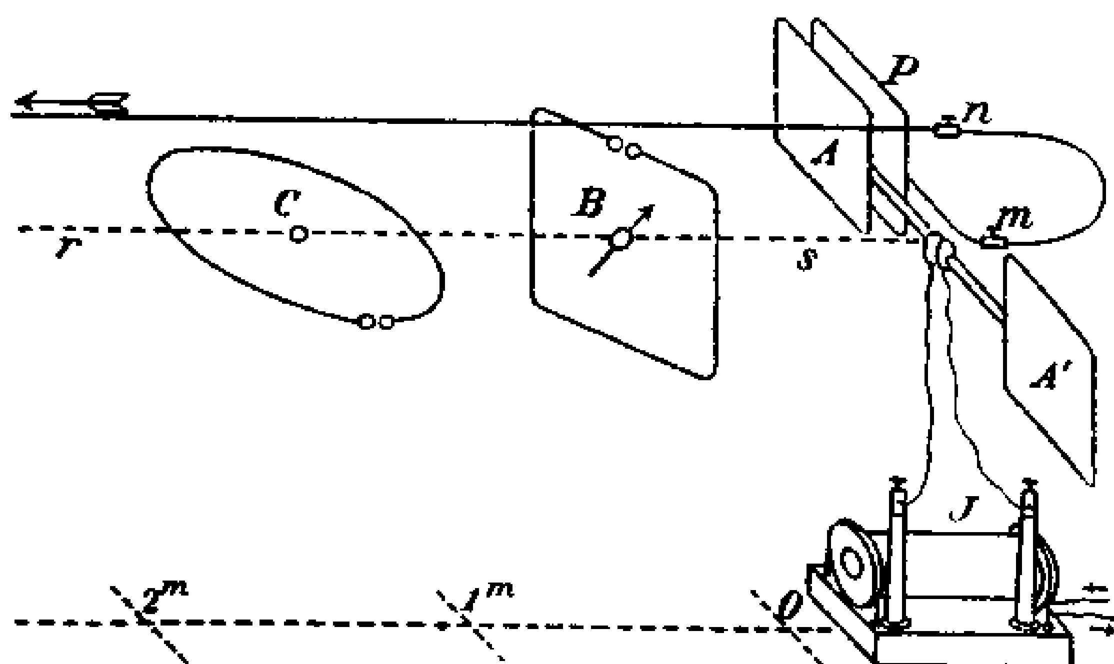


图 4.6　海因利希·赫兹对电磁波传播速度的实验测定。这一装置中由铜板 AA' 间的火花隙来产生电波，AA' 同感应线圈 J 相连，电磁波由方形线框(B)或圆形线框(C)检测。为了在导线中形成电波，赫兹在铜板 A 的后面放置另一铜板 P，并将 P 同导线 mn 相连，再将 mn 接地。赫兹的演示说明，直接从空气中传出的波和沿导线传播的波之间发生干涉现象，虽然他对电磁波在空气中的传播速度的计算，因为难以确定电波沿导线传播的速度而发生困难。在此后所做的关于电波反射的实验中，赫兹测量出电波在空气中的波长与电磁波沿导线传播的具体情形无关。因此，他用实验证明了电磁作用确以一定的速度沿着空间传播，并且得出光速与电磁波速度相同的结论。赫兹后来还确立了电磁波的折射和偏振，说明光波和电磁波两者是类似的。他始终认为，他的实验为麦克斯韦的光的电磁理论提供了实验证据。［资料来源：Heinrich Hertz, *Untersucbangen Überdie Ausbreitung der elektriscken Kraft* (Leipzig,1892),p.116,fig.25］

“光、辐射热和电磁波的运动是完全相同的”。他强调指出，这些实验的价值不受任何特定理论的假设所左右，不管怎么说，他清楚地表明，这些实验完全支持麦克斯韦的电磁以太理论。赫兹的实验对欧洲大陆物理学家产生了重大的影响，使他们承认了电磁场的概念。丹麦物理学家亨里克·恩托·洛伦兹（Henrik Antoon Lorentz，1853年—1928年）赞同亥姆霍兹的理论，他说出了赫兹的实验是“麦克斯韦理论的伟大胜利”这样的话，就清楚地表明他承认了电磁场理论。

不管怎么说，麦克斯韦的电磁学理论的确提出了值得研究的问题。赫兹在1884年的文章中，虽然对电磁以太并没有作任何假定，但利用电力和磁力间的形式上对称的关系，建立了表示力传播的场方程。他对麦克斯韦以太的重新认同和对麦克斯韦文章的形式一致性的不满，促使他为麦克斯韦的电磁场理论寻求一种公设性的方程式。麦克斯韦本人曾在1868年发表的一篇论文中对场论提出了一种解析表述，作为表示电力和磁力之间互易关系的公理，建立了电磁场的基本方程式。场论的这一简洁表述并没有涉及到以太模型，但为电磁学的场论提供了解析的基础。利用电力和磁力间的对称关系来建立电磁场的方程，奥列弗·海维赛德（Oliver Heaviside，1850年—1925年）在19世纪80年代后期也提出过这种看法。在确立毋须采用以太模型的场概念来建立方程的过程中，海维赛德用电力和磁力间的相互作用和场中的能量通量，表述了电磁场的物理状态。不考虑符号上的差别，赫兹和海维赛德建立的电磁场方程大体上是相似的。赫兹在1890年发表的论电动力学理论的文章中，重提了他的方程，明确地表示他的论证是麦克斯韦电磁理论的公设形式。赫兹指出他的观念在海维赛德的工作中是没有的，他在论述他的电磁学理论的正确性时，又补充了他的数学论证，并且在他的论电学的论文集（《电力传播的研究》）的序言中，又补充了麦克斯韦的评论。

赫兹的论述是针对麦克斯韦对电荷的定义和电'位移'概念的模糊之处展开的,电的'位移'是麦克斯韦为描述以太极化时引进的概念。赫兹被以太极化和电的位移两者间的关系所困扰。他对问题的解决办法是消去'位移',把电力作为独立的概念,因此就没有必要解释电荷的位移究竟是极化的原因还是极化的结果。在赫兹对电磁场方程的描述中,位移的消除有利于从电力和磁力间的对称关系来建立方程。赫兹声称这些方程表述了麦克斯韦工作的本质部分,他指出"麦克斯韦理论也就是麦克斯韦的方程组"。但是,麦克斯韦在论文中阐述的电磁场方程包含的概念问题已被赫兹丢弃了,因此赫兹断言,从赫兹的电磁场方程组出发,更加准确地说明了麦克斯韦理论的核心观点。

赫兹的关于场方程的公设表述回避了麦克斯韦所用的电磁概念的"具体描述"。尽管赫兹希望将力学模型的"欢乐外衣"同场论的形式区别开来,但他始终没有放弃机械论的自然观。他始终相信电磁波是由以太产生的教条,因为以太的各部分又是同力学结构相关的。无论如何,他从电磁学的形式以及用力学模型对电磁学的描述中发现的形式上的区别还是很有影响力的,这就使电磁场理论的表述远比麦克斯韦论文中的表述更加清楚,并且更加突出了决定电力和磁力的方程组取得一致解释的核心问题的地位。赫兹的简化电磁场方程是使场论为大家所认可做出的重大贡献。

通过以太的运动问题

赫兹对电波所作的光辉夺目的实验演示,被看作为麦克斯韦理论基本原则的完全确立,亦即电磁以太理论得到了完全的确立。菲茨杰拉德于 1888 年在英国皇家学会上对赫兹的工作作了专题介绍,明确地指出,"赫兹的实验证明了电磁学的以太理论"。无论如何,关于以太的物理地位问题,以及发光以太和电磁学概念之间的相互

关系问题，都是19世纪80年代有过很多争论的问题，赫兹于1890年在一篇论动体的电动力学的理论性文章中参与了这场争论。

赫兹把他的动体的电动力学理论建筑在假设——以太在力学上是由不可称量的物体在以太中的运动拖动的——基础上。他论证指出，这一假设同已知的电磁现象并没有矛盾，通过这一假设，他能够建立起一种系统的电动力学理论，并且这一理论又与他已建立的适用于静体电动力学的理论完全自洽。他指出，这个假设对于解释光学现象来说是不充分的，但是观测指出，一种完全的综合理论应当能够将以太和嵌在以太中的物体两者的条件区别开来。为了建立这样的一种综合理论，就需要提出不受所考虑问题制约的任意的假定，亦即不受动体的电动力学描述制约的假定。在提到他的理论的局限性时，赫兹强调了光学现象与电动力学现象之间的相互关系问题，并且指出，要维护麦克斯韦电磁以太理论中将光学和电磁学统一起来的正确性，需要我们对物体通过以太的运动作出精心的系统描述，亦即需要说明以太同物质的相互关系。

游离在赫兹的电动力学之外的光学现象还包括星际的光行差和以太拖曳。光行差现象是指地球的运动造成恒星明显移位的现象，从发光以太理论来描述光行差是有困难的。用光的波动说来解释星际间的光行差看来也需要作一些假定：地球通过以太并未扰动以太，因为以太的任何扰动都会使光线偏离原来的直线路径。为了避免可能遇到的困难，先假定以太受到了地球运动的扰动，杨氏和菲涅耳都承认以太自然而然地弥漫于一切材料物体中，而且以太不受地球运动的干扰。19世纪早期在讨论光行差和以太拖曳时所遇到的主要问题，是关于发光以太的性质对星际光行差产生何种影响的问题。为了解释阿拉戈检测以太和地球间相对运动所做的光学实验的失败原因，菲涅耳提出，光通过透明物体时，透明物体会有部分以太拖曳的效应产生，他对这种效应的计算得到了希波里特·斐索（Hippolyte Fizeau，1819年—1896年）在1851年的实验的证实。

杨-菲涅耳的地球毫无阻碍地通过以太的理论,受到斯托克斯在 1845 年提出的质疑。斯托克斯设想以太是一种具有粘性的弹性固体,他的结论是:以太和通过以太移动的地球之间必定有粘性摩擦存在。因此,应当坚决抵制菲涅耳设想的地球毫无阻碍地通过以太的看法。斯托克斯取代了菲涅耳的定态以太理论,坚持认为地球和行星在运动时会拖着贴近表面的一层以太一起动,超出地球拖曳的边界层,地球的运动就不再扰动该空间的以太了。为了解释星际的光行差,斯托克斯提出了地球穿过以太运动的解析表示式,对以太运动强加了一种数学限制,这种限制的物理结果是:地球周围的以太中不出现涡流现象。尽管菲涅耳理论同样能解释光行差和地球通过以太的运动问题,但斯托克斯对这些问题提出了另一种说法,根据他的权威的以太弹性固体模型,这一理论能够解释地球穿过以太的运动。

以太拖曳的问题在 19 世纪 80 年代引起了广泛的关注,这是随着麦克斯韦所阐述的以太在电磁学现象中所起作用的理论传播引起的。以太与物质的关系问题,地球运动对电磁现象的影响问题都是由于麦克斯韦的工作而引起关注的。麦克斯韦自己就讨论过如何检测地球通过以太运动的实验问题,提出当光沿相反的两个方向传播时通过检测光速度的变化,就可能检测到以太。麦克斯韦的评论激励了美国物理学家阿尔伯特·亚伯拉罕·迈克尔孙(Albert Abraham Michelson,1852 年—1931 年)在麦克斯韦讨论过的条件下,用实验去测量光速的变化。迈克尔孙可能知道斐索曾利用半透镜,使一光束通过一段距离后再回到镜子后面的观测者处,他的设计思想是:让来自同一光源的两束光沿着同样长度的两条路线同时跑一个来回,但这两条光路互成直角。迈克尔孙设计了一种装置(干涉仪),测量由这两束光所产生的干涉条纹。预先假定定态以太的菲涅耳理论是正确的,这一正确性已得到斐索实验的支持,迈克尔孙假定:两束不同取向的光,由于地球通过定态以太的运动而使两束

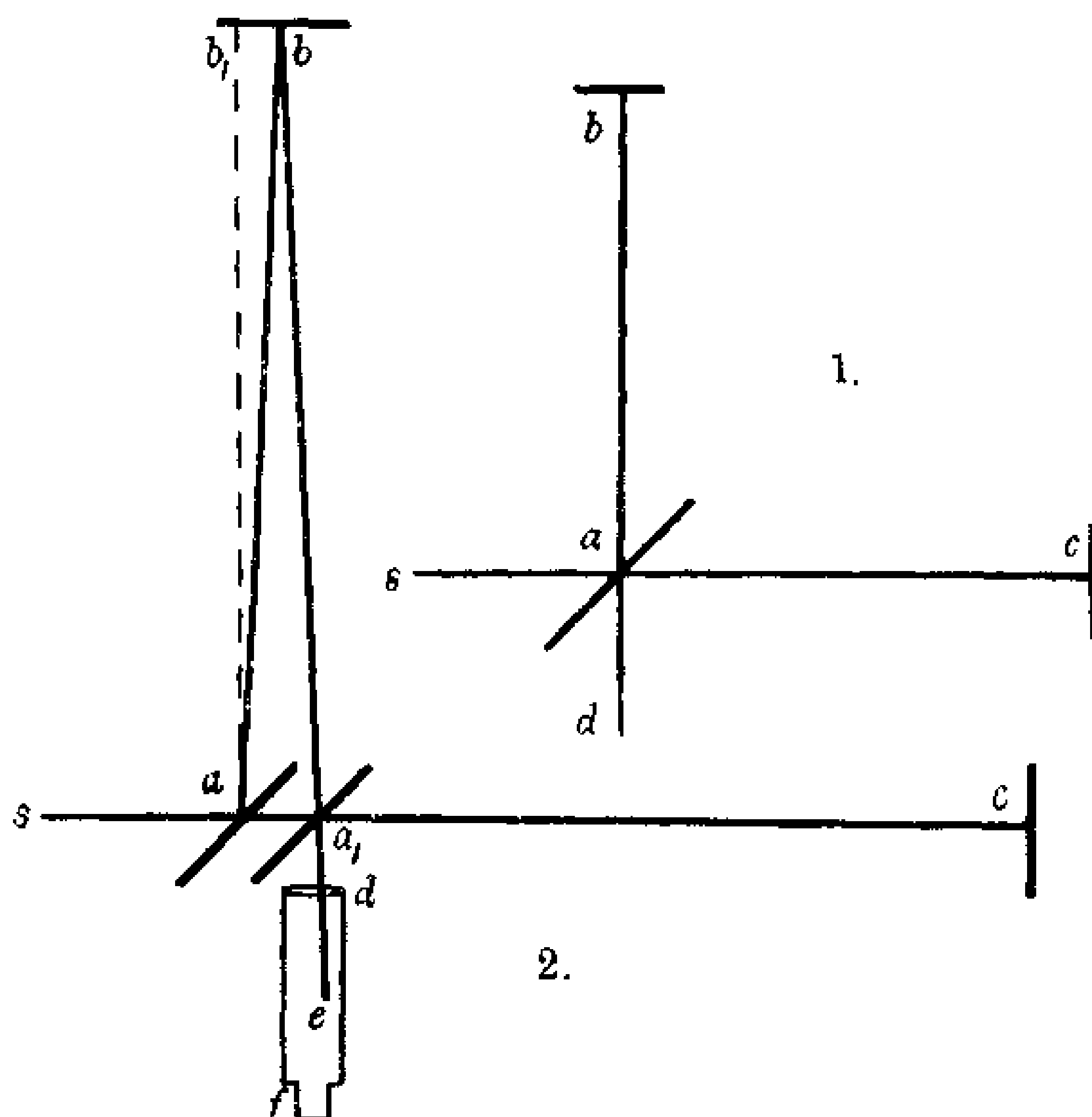


图 4.7　1887 年 A·A·迈克尔孙和 E·W·莫雷用于检测地球与发光以太相对运动的实验。在其中的图 1 里，光线 *sa* 经半透镜后，反射光部分为 *ab*，透射光为 *ac*；这两束光经反射镜 *b*、*c* 分别反射后再沿 *ba*、*ca* 至半透镜，*ba* 经半透镜又分成为沿 *ad* 透射和沿 *as* 反射两部分，*ca* 则产生 *ad* 反射部分和 *as* 透射两部分。设 $ab = ac$，则沿 *ad* 的两束光会发生干涉。图 2 说明当整个装置沿 *sc* 方向以地球沿轨道运动的速度运动时的情形，设以太静止不动。如果整个装置转了 90°，光线传播的方向和距离都可能发生改变，这两条路径的光程差正好相反。迈克尔孙和莫雷正是测量了当装置转过 90°后，这两束光的干涉条纹的移动情况，他们希望根据干涉条纹偏移量的大小算出地球相对以太的运动速度，理论根据正是菲涅耳的光行差理论。

通过以太运动的光产生不同的影响。实验是在1881年做的,得到的结果是令人惊奇的:地球相对以太的运动是检测不到的。迈克尔孙的结论是:定态以太的假设是不正确的,明确指出斯托克斯的所谓地球通过以太时拖曳以太运动的理论是不可取的。

洛伦兹在1886年发表了一篇论地球运动如何影响光学现象的文章,重点讨论了以太与物质的关系。洛伦兹既批评了迈克尔孙的计算结果,也论证了斯托克斯的以太拖曳学说是建立在不足取的假设之上的。洛伦兹赞同菲涅耳的定态以太假设。尽管定态以太学说是迈克尔孙希望证实的理论,但他的实验结果却使人们对菲涅耳的理论产生了怀疑。为了解决这一个问题,迈克尔孙又同爱德华·威廉·莫雷(Edward Williams Morley,1838年—1923年)合作,又做了两个更深入的实验,重复了斐索对菲涅耳的以太部分拖曳理论所作的测试,而且还重复了迈克尔孙的以太漂移实验。迈克尔孙和莫雷的实验明确了斐索所证明的菲涅耳的以太部分拖曳假设是正确的,由此他们的结论是:菲涅耳的定态以太理论被证实是正确的。然而他们又一次得到了迈克尔孙以太漂移实验的重复结果,这意味着否定的结论:(在实验误差的限定之内)又一次得到了"否定"的结果,

图4.7(续)

迈克尔孙干涉仪中的半透镜(将光源的光线 *sa* 分成为反射和透射的两束光)和用于测量干涉条纹安装的望远镜,都是这套装置中加工精细的部件。为了消除装置的不稳定,实验是在相当精细的条件下进行的,为了避免振动,整个装置安放在一块巨大的石板上,石板则放置于水银池中。为了克服空气流的影响和温度引起的变动,全套系统又被罩在一座小木屋里。同他们的预计不同的是,当整个装置转过90°时,测出的干涉条纹移动极微小,因此迈克尔孙和莫雷只好作出这样的结论:如果说地球相对于发光以太有任何相对运动存在的话,那也是微乎其微的,因此菲涅耳的光行差解释是不能成立的。[资料来源:A.A.Michelson and E.W. Morley, On the relative motion of the earth and the ether, *American Journal of Science*, 3d ser.34(1887),335,fig.1,2]

亦即并没有检测到地球通过以太的运动。迈克尔孙和莫雷的结论是：如果地球和以太之间有任何相对运动的话，那必定是非常之小以致定态以太理论难以成立。

1890 年当赫兹讨论动体的电动力学时，物理学家们都在积极地思考以太拖曳和以太与物质相互联系的问题。虽然洛伦兹的理论分析和斐索的实验都说明菲涅耳的所谓地球毫无妨碍地通过以太的假设是正确的，迈克尔孙-莫雷在 1887 年所做的以太漂移的实验，已经得出了决定性的结论：菲涅耳的定态以太理论是不对的。赫兹在作出地球通过以太的拖曳假设时，有意作了一个简化的假定，把电动力学描述的任务留待以后再分析，但电动力学描述的物理理论基础是坚信以太和物质间确有关联。麦克斯韦，洛伦兹和赫兹都认为，建立物质和以太两者关系的理论是十分重要的。正如赫兹所说的那样，这种理论的建立将为动体的电动力学奠定理论基础，电动力学理论则建筑在深刻的物理假设基础上。

洛伦兹和电磁学的世界观

洛伦兹在 19 世纪 90 年代对自然界的电磁理论发表了一系列论述，他假定带电粒子（1895 年时称之为‘离子’，1899 年则称其为‘电子’）是镶嵌在电磁以太中的，借此，他系统而详尽地描述了以太和物质的相互关系并建立了动体的电动力学。根据他的成熟的电磁以太理论，他提出应该抛弃以太的所有机械特性，把自然规律都归结为由电磁场方程所描述的性质。洛伦兹完成了在电磁概念基础上发展起来的普遍物理学。根据这种成熟的电磁学世界观，洛伦兹解释了以太与物质的关系。同麦克斯韦不同，麦克斯韦把以太作为物质的一种状态，洛伦兹则将两者涉然分开。他设想物质就是带电的粒子（电子），从而把物质和以太分别开来，并且从电子和电磁以太两者的关系出发来解释以太和物质的关系，因而电磁场和物

质截然分开了。

洛伦兹的电磁世界观植根于他对以太和光的电磁理论的研究工作。他在 1875 年的博士论文中，采用了亥姆霍兹对电磁波方程的演绎办法，并利用这一办法分析光的反射和衍射。直到 1891 年为止，他一贯支持亥姆霍兹对电动力学和光的电磁理论的处理办法。洛伦兹相信，赫兹对电磁波的实验验证为麦克斯韦的场概念提出了很有说服力的证据。他明确地表示，他承认麦克斯韦的场概念是正确的。但不管如何，洛伦兹却不同意赫兹的电动力学理论。在他的关于电子论的头一篇题目为"麦克斯韦的电磁理论和它对动体的应用"(1892)的文章中，洛伦兹批评赫兹只根据自己有限的动体电动力学，对场方程和总的以太拖曳作出公设性的妄断。

洛伦兹强调自己只赞同定态以太理论，通过使用麦克斯韦在论文中已经用过的拉格朗日动力学方程，建立起电磁场理论。洛伦兹证明，以太本质上不同于普通的物质，电子论使他确立了以太同物质的联系。他论证指出，普通物质的分子含有正负荷电粒子(电子)。电磁场是由这些粒子的运动造成的，场可能通过对嵌在物质里的电子施加力而对普通物质产生作用。洛伦兹的电动力学就是用电粒子带电来解释并建立电磁场的协调一致的理论。洛伦兹把他的理论说成是对欧洲大陆电动力学的高度综合，亦即用粒子间所产生的力来解释电的相互作用，而麦克斯韦的电磁场理论则强调电的作用是以光速传递的。洛伦兹的电动力学方程表述了电磁场及场与电子的相互联系。他的文章中还包括了这样一种表述：透明的动体所引起的部分以太拖曳的所谓菲涅耳理论可以用光的干涉而不是用以太的机械拖曳来加以解释。洛伦兹论证指出，透明动体对其透明入射光的影响，完全是因为入射光和电子振动所产生的光波两者间的干涉，电子之所以发生振动，那是因为入射光对电子的作用引起的。

因此，洛伦兹是肯定定态以太理论的物理学家。不过定态以太

的假设同迈克尔孙-莫雷实验的否定结果是完全矛盾的，洛伦兹在1892年末所写的一篇论文中，对此提出了一种解说（菲茨杰拉德也独立地提出过这一说法）：干涉仪随地球在以太中运动的方向上的那一臂缩短了。他是这样解释这种收缩效应的：决定物体尺寸的分子力通过以太的传播就像通过电力的传播一样。就是这种收缩效应和其他的补偿作用，抵消了地球通过以太运动所产生的以太拖曳这一预期的效应，这就解释了迈克尔孙-莫雷实验的否定结果。

撇开洛伦兹强调他的电动力学的“动力学”基础不谈，他的理论并没有限制以太和普通物质的联系。以太和电子间的力是电性质的力，与其说他的理论是表示电磁以太，倒不如说是一种力学自然观的表述。他的核心论文“动体中电-光现象的理论研究”（1895），重申从力学原理出发推导理论的基本方程的重要性。洛伦兹指出，采用类似于赫兹的方法，电磁场方程和把场与电子联系起来的方程都属于最基本的电磁学假设范围内的方程。同赫兹坚持相信力学以太的理论形成鲜明对照，洛伦兹宁可相信明确的自然电磁理论，也要抛弃动力学原理的框架。根据他的这种看法，能够提供物理学概念基础的是电动力学，而不是力学。洛伦兹建立了关于收缩假设的一种十分准确的数学公式，重申了他的结论：取决于干涉仪臂长的分子力通过以太传播的行为完全像电力传播的方式一样，现在我们把这种论证作为他的电磁学自然观的理论核心。他对力学自然观所持的反对立场，由于他的明晰的阐释而得到了加强，他阐释指出，场完全摆脱了力学的所有性质并与普通物质完全分离了，场完全是一种独立的物理实在。

在后来的理论阐述中，洛伦兹又进一步修正了传统物理学说的力学基础。从电的离散单元（“电子”）的经验可以发现，洛伦兹理论似乎提供了经验的证据，在他发展起来的理论中，电子的性质并不是用力学的术语，而是用电磁学的术语来说明的。假定电磁学是建立物理学的概念基础。万有引力定律则可用电磁以太理论给予

解释，力学定律又被作为电磁学普遍定律的一种特例来处理。洛伦兹用电磁学术语来定义惯性和质量，他否定质量是一个不变的恒量（这是牛顿力学的基本原理）。洛伦兹将质量概念作为一种电磁学的概念来看待是很了不起的，因为这一看法的影响十分深远。

大约到了 1900 年，洛伦兹的理论对物理学的发展就产生了极其深刻的影响。很多物理学家都指出，物理学统一的概念基础是由电动力学提供的，而不是由力学提供的。以太的概念使我们摆脱了一切力学性质，对多数物理学家来说，几乎都认识到这就是物理学理论的整个根基。电子和电磁以太的本体论并不是建立在力学原理的框架之上，它的发展完全取代了 19 世纪物理理论界占统治地位的机械论理念。在建立电磁场理论的过程中，洛伦兹作了一个不同于力学解释纲领的重大创新。不过赫兹继续坚持电磁以太可以用隐含物质运动的术语来加以描述，洛伦兹认为场论可以根据电磁学本体论来加以推广。电磁场的拉莫尔尔理论则认为，场是以太媒体的动力学理论，电子是以太中转动张力的中心；洛伦兹否定场理论的所谓动力学基础，认为电磁概念才是唯一的物理学基础。

第五章
物质论：分子物理学问题

关于物质的物理构成，在整个 19 世纪内还是不太清楚的。尽管物质粒子运动的本体论对于力学解释纲领和热力学之间的概念一致性来说的确是至关重要的，但是物理学家们还是认真地注意到物质粒子论的一般假设与分子结构的更加特殊的模型两者是明显不同的。虽然热的机械论把物质粒子的运动作为热功等当原理的基础，但物理学家们发现，只是到了 19 世纪 50 年代气体运动论发展之后，物质分子论才逐渐明确起来。至于光谱现象的如何解释问题，则还需要假定分子具有复杂的内部振动才行，这就使气体运动论在形式上如何统一的问题产生了困难。分子物理学本身出现了很大的矛盾：光谱学和气体运动论的经验有限，还很难确立物体分子结构的统一理论。分子物理学问题描绘了热力学的大致发展趋势：确立分子运动的统计理论，这是由气体运动论发展起来的精髓部分，由此把热力学第二定律作为不可逆的统计定律来加以解释。对于化学家来说，物质论的问题似乎还是相当复杂的问题，原子论的地位问题一直也是争论不休的课题。

化学原子论

19 世纪化学家们所用的化学'原子'论和牛顿建立的原子论是有重大差别的,牛顿的理论对 18 世纪化学理论的发展产生了重要的作用。按照牛顿的化学,认为粒子排布成原子的方式是元素的特征,因此每种化学元素都有自己的独特性质,而这些粒子又会以特定的形式进一步集结。因此,可以想到所有的化学元素其最终原子的化学结构都是各不相同的。通过粒子间的相互作用力的作用,原子彼此紧靠在一起。牛顿时代的化学家提出过化学亲和力的一种定量科学,不过其他化学家对于从这种理论出发去研究化学物质和化学反应表示异议,他们追随 G·E·施塔尔(G. E. Stahl)的看法,坚持认为物理原理不同于化学原理,并且认为物理上的原子论假设(施塔尔认为无法解释化学现象)完全不同于化学元素的理论,化学元素才是化学分析的最终产物。施塔尔强调指出,普遍的化学哲学对法国的化学家们产生了深刻的影响,这为拉瓦锡把化学元素作为化学分析的最终产物奠定了基础。拉瓦锡注意到,虽然化学亲和力的研究原则上还要借助数学的应用,但原子论本身还不能作为化学理论的可靠基础,虽然他承认原子论是物体物理构成的一种表述,但他认为对原子的推测与化学科学并没有多大的关系。

琼·道尔顿(John Dalton, 1766 年—1844 年)的工作奠定了化学与化学元素两者相互一致的理论基础。道尔顿在其"化学原子论"的论述中终于消除了物理原子和化学元素间的传统差异。在《化学哲学的新体系》(1808 年—1827 年)一书中,他将化学元素的多样性与多种物质组分的化学"原子"等同了起来,他反对牛顿把最原始的物理原子同由这些原子集结成的多种物质组分的化学元素截然分开的看法。道尔顿也放弃了牛顿根据化学原子的相对重量来确定力的定量关系的机制。道尔顿是在研究气体在水中的混合和

吸收的基础上建立他的化学原子论的，根据这一理论，他否定了对化学亲和力中的力的解释机制。根据他的气体吸收理论，他强调指出，物质最终粒子的相对重量对不同气体在水中的相对溶解度起到了决定性的关键作用。为了计算相对原子量，他的兴趣逐渐地转到化学和化学化合的问题上来了。

在《化学哲学的新体系》一书中，道尔顿把自己的研究工作同杰里迈亚斯·本杰明·里切特尔（Jeremias Benjamin Richter，1762 年—1807 年）建立的所谓等当量化学定比定律结合了起来。根据里切特尔的'化学计量学'（Stoichiometry）理论，化学化合是由解析数据直接算出的元素的相对重量来描述的。根据里切特尔的理论，道尔顿指出，化学元素是以简单的整数比彼此化合的，因此他断言化学原子只能以固定的比值实现化合。化学原子论为化学计量学的解析比值作出了解释，但是道尔顿不仅用术语"原子"来表示具有给定化学性质的化学元素的最小的粒子，在化学化合时只以整数数目与另一种基本粒子结合，而且还用原子来表示刚性而不可分的终极粒子。因此道尔顿得到的结论是：化学元素和初始的物理学原子并没有区别。

道尔顿的定量化学并不是根据化学亲和力的数学描述建立起来的，而是根据化学化合的规则确立的，并且也是在根据原子的相对重量对化学原子进行分类的基础上完成的。从元素只按一定的重量比值结合成化合物的结果来看，元素原子的相对重量比是一个恒量。虽然道尔顿在《化学哲学的新体系》的第一卷中强调指出，粒子相对重量和化学分析结果的化合规则是一致的，但他要求把他的化学原子作为自然界的最终粒子给予特殊的地位。在《化学哲学的新体系》第二卷（1810 年）中，以及后来关于化学原子的一系列表述中，他坚信各种各样的化学原子都是物理上实实在在的基本粒子，他对牛顿的化学元素都有复杂内部结构的学说持否定的态度。从《化学哲学的新体系》一书的一幅插图中我们可以看到，不可称

量又不可分割的原子被热质大气包围着,他相信他的原子是刚性球形的,而且就是自然界中最终的化学粒子和物理粒子。

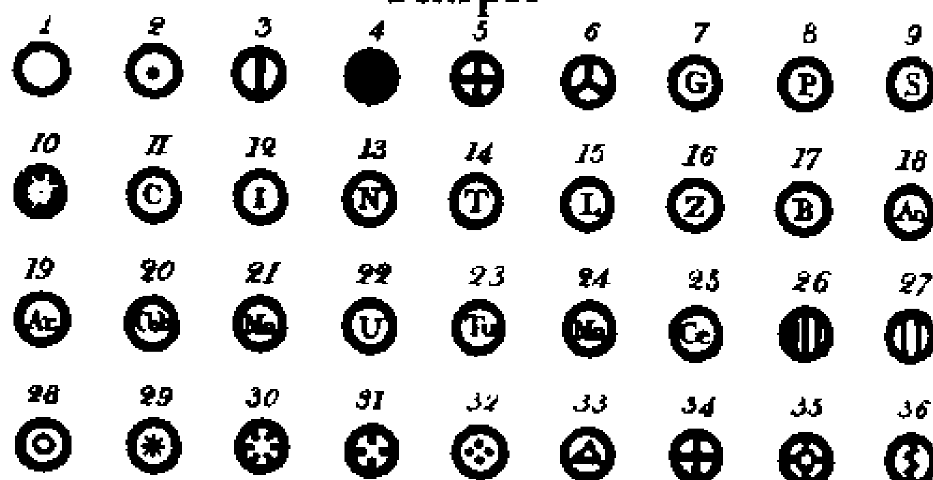
把'化学'原子论和'物理'原子论区分开来,对于说明道尔顿的观念对19世纪化学所产生的导向性影响来说是相当重要的。物理学家和化学家都认识到化学原子论的地位同物理实际及原子性质的假设是不相称的,化学原子论为相对原子量的计算方法并为写出化学物质的分子式提供了概念上的合理性。化学家用图形和模型来表示分子结构,图形和模型通常分子几何结构的符号表述。为了不必过多地考虑道尔顿理论的物理含义,化学家们在建立化学计量学定律时尽量回避了关于原子的假设,但是一贯坚持的是粒子的相对重量的计算方法。从1810年到1814年约5年时间里,戴维,威廉·海德·沃拉斯顿(William Hyde Wollaston,1766年—1828年),以及琼·雅可布·伯齐留斯(Jöns Jacob Berzelius,1779年—1848年)制订了粒子的相对重量数表,并以这种方式回避原子论的假设。戴维证明,以化学计量学代替对物质最终粒子所加的猜测,才是组成道尔顿理论的核心。他提出用"比例"方法或用相对重量方法作为确定化学化合中比值的计算基础。沃拉斯顿的'化学等价值'确立了元素的重量表,这是化学计量学的一种计算办法,也是计算化学配比的一种实用工具,这又是在经验基础上普遍使用的方法。无论如何,沃拉斯顿最终承认,他的表只有由等价性表示的相对原子量的假设出发才能理解。虽然在读道尔顿的《化学哲学的新体系》时,伯齐留斯制作了元素重量表和分子式,不过他关于化学计量学定律的图表,当初是作为结合比的经验表发表的。

许多从事化学计量学和元素重量研究的化学家,所得出的结果都相当一致。伯齐留斯,戴维,沃拉斯顿的化学计量法同道尔顿的方法是相似的,除了道尔顿用了概念上另有用意的术语"原子"之外。威廉·惠威尔(William Whewell)在他的《演绎科学的历史》(1837年)一书中回顾了这一问题,他指出,在表示相对原子重量时,用术

ELEMENTS.

Simple

Plate 5.



Compound

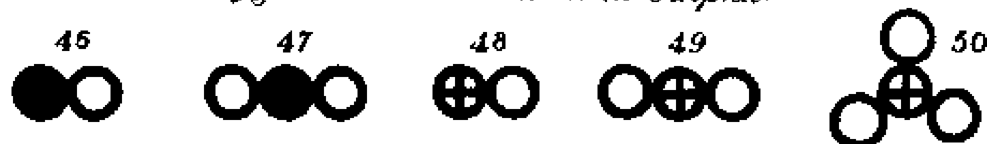
Oxygen with Hydrogen



Oxygen with Azote



Oxygen with Carbone and Sulphur

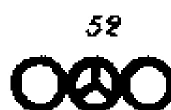


Oxygen with phosph.　　*Hydrogen with azote & Carbone*

51



52



53



54



55



Hyd. with Sulph. & phosph　　*Sulphur with phosph*

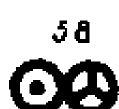
56



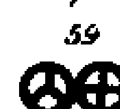
57



58



59



60



语"原子"要比用另一种术语"比例"或"等价"更加有利。但他强调指出，"原子"的使用毋须理解为同意最终不可分割粒子的假设。大约到了19世纪30年代，原子论的使用还局限在化学的范围内，原子只表示化学上不可分的粒子，这一学说当时已经建立起来并且奠定了讨论分子式的基础，当时的化学家已经把分子式作为头等重要的问题看待了。原子本身的地位问题，以及分子式的符号重要性问题，是一直争论不休的问题。1837年，J·B·杜麦斯(Jean Baptiste Dumas，1800年—1884年)评论道：他希望把原子这一术语从化学科学中抹去，因为这一术语的根基离经验太远了。他对道尔顿理论中的原子不可分割性假设表示异议，但对化学粒子在形成化合物过程中构成分子基团的合理性又表示赞同。

有机化合物与无机化合物的关系也是19世纪化学家关心的重大问题。伯齐留斯论证后指出，对有机化合物性质的探索应当根据无机化学所建立的原理来办。他认为化学原子论必须解释原子以

图5.1　取自道尔顿的《化学哲学的新体系》(1810年)一书第二页上的元素表。这一页的插图标明了道尔顿的元素符号，这里已将《化学哲学的新体系》(1808年)中所用的符号稍作改动。附表里还注明了元素原子相对于氢的重量。前10种元素及它们的相对重量分别是：氧(7)、氢(1)、氮(5)、碳(5.4)、硫(13)、磷(9)、金(140?)、铂(100?)、银(100)、水银(167)。用原子的排列来表示的化合物分别为：图37代表水、图54代表氨、图56代表硫化氢。这些图说明，道尔顿相信化学元素是由不同化学组分的原子组成的。道尔顿的化学原子论指出，化学上不可分割的粒子(原子)具有唯一的原子量；但是道尔顿也断言：与化学元素相当的'原子'就是自然界的基本粒子。

道尔顿对相对原子量的计算是根据他的假设完成的，亦即假设化学物质的分子是由它们的组分原子按最简单的可能组合构成的。通过论证得出：正确的简单规则分子是由差别较大又互相排斥的不同原子构成的。他还证明原子差别越大，形成的分子的内部稳定性就越高。这种论证是根据他对气体混合物的讨论得出的，他强调指出，气体粒子的种类相似，彼此间互相排斥。[资料来源：John Dalton, *New System of Chemical Philosophy*, pt.2, p.548, pl.5 (Manchester, 1810)]

特定的比例通过化学亲和力理论结合的道理，他还提议，用化合物原子的电化学极性很可能可以解释化学计量定律。化学的结合使得各个原子或原子集团的正负电荷达到中性化为止，这是伯齐留斯用来研究有机化合物的结合理论。他强调了化学化合物中原子排列的重要性。在回应由弗雷德里希·伍勒（Friedrich Wöhler，1800 年—1882 年）于 1828 年由氨和氰酸铵得到合成尿素的结果时，伯齐留斯论证道：伍勒把无机盐氰酸铵变成有机化合物尿素的过程，这就为他所谓的“同质异能”现象提供了一个实例。亦即说明相似成分的物质，具有相同配比的组成成分，但分子的构型却可以不同。关于分子的构型，伯齐留斯是用他的化学亲和力的电学理论来加以解释的。

到了 19 世纪 30 年代，化学家对元素在有机化合物中如何排列的问题特别感兴趣，当时元素的组成已经明确，也就是说要搞清的是原子在化合物中如何排布的问题。李比希和杜麦斯的“基团”理论，认为无机元素和甲基、乙基这样的所谓的“基团”的功能是相当的，基团是指有机化合物中元素团簇，基团理论使我们可以用无机化合的规律来研究有机反应。到了 19 世纪中期，化学原子完全充斥在有机化学的理论之中。奥古斯特·劳伦特（August Laurent，1807 年—1853 年）采用三维几何结构，根据结晶学的思想，来描述原子在有机化合物中的排列情况。尽管劳伦特对有机化合物的分子组成可以从它们的化学反应过程推断出来的假定持怀疑态度，但还是十分重视分子结构的模型建设。劳伦特强调指出，这些结构只是用类比性的符号公式来表示类似组分的有机化合物，并不表示有机化合物中原子的真实分布。有机化学家采用模型去描述有机化合物的分子结构。正如奥古斯特·凯库尔（August Kekulé，1829 年—1896 年）于 1867 年著述中所指出的那样，化学原子论的目标并不是建筑在把原子作为真实存在的一个个粒子的假设基础之上，而是为了应用原子论对化学反应和化合物的结构作出解释而提出来的假设。

不管原子论是作为化学理论的清规戒律建立的情况如何，化学原子论的地位在 1866 年受到本杰明·柯林斯·布罗迪（Benjamin Collins Brodie，1817 年—1880 年）的挑战。布罗迪深受查尔斯·弗里德里克·杰哈德（Charles Frédéric Gerhardt，1816 年—1856 年）在有机化学方面工作的影响，提出了一种所谓化学符号论，根据这一理论，化学结合的定律完全不按原子论解释的方式给以分类。杰哈德坚持认为，化学方程式只表示化合物在化学反应过程中的趋向。从化学反应可以判断分子构成的假定是值得怀疑的，因此他放弃了描述分子组成的努力。描述化合物结构的分子式表现出化学的特性。布罗迪对化学反应物作了一系列运算，得出表示化学方程式的化学计算方法，他还提议用化学代数学取代分子结构的几何学。布罗迪的工作引起了激烈的争论。阿历山大·威廉·威廉姆孙（Alexander William Williamsen，1824 年—1904 年）的回应是：化学原子论的地位不应该因为原子的不可分性而被贬低，这也不是一个由化学引起的问题，而是一个如何用粒子性语言，亦即用原子量和分子式的语言去描述化学现象的问题。根据威廉姆孙的看法，化学现象只有按照化学原子论才能作出解释；而凯库尔则坚持认为，化学原子论的假设从本质上讲只是为了解释化学现象而已。

但无论如何，到了 19 世纪 60 年代，化学原子论的地位已相当稳固了。1860 年，化学家们在卡尔斯卢希（Karlsruhe）举行了一次会议，专门讨论过原子论的地位问题。斯丹尼斯劳·卡尼扎罗（Stanislao Cannizzaro，1826 年—1910 年）在会上散发了一篇论文，文中他重提了由阿米蒂欧·阿伏伽德罗（Amedeo Avogadro，1776 年—1856 年）最先提出的假设。根据“阿伏伽德罗假设”，同样体积的气体，在相同温度、相同压强的条件下，含有相等数目的分子。虽然这个假设几乎人人皆知，阿伏伽德罗的工作还提出了确定分子式和相对原子量的一种办法。气体分子的重量与气体密度成正比，而化合物的分子式可以由反应物的体积推算出来。这种确定原子量的办法，直到

卡尼扎罗重申阿伏伽德罗的工作提供了得到确定原子量的一种计算办法后才站稳脚跟，从而巩固了化学原子论的概念地位。1860 年，麦克斯韦根据他的气体理论，导出了一个能说明等体积气体含有等数量粒子数的化学定律的数学表达式。正如麦克斯韦对正在讨论布罗迪的工作的化学家们所强调的那样，气体运动论为物质粒子论提供了重要证据。尽管原子的性质还是一种停留在猜测阶段的事情，到了 19 世纪 60 年代，物质分子论和化学原子论都已渗透到物理科学之中了。

分子物理学：气体运动论

早在 1850 年克劳修斯在建立热力学的概念基础时，他就注意到，如果假定热是由物体组成粒子的运动引起的，尽管热功等当性原理可以认为是在概念上可以理解得通的，但他并没有考虑分子运动的性质，正是分子运动才引起热现象，况且热运动还可以转变为机械功。他则以建立与物质性质的假设无关的热力学公理来对待这一问题。克劳修斯在论我们所谓的热的运动类型（1857 年）一文中，提出了一种全面的分子运动论解说，这是确定气体理论与热力学基本问题之间关系的构架，也是热力学概念同物质结构的相互关系。

虽然气体运动论并不是克劳修斯最先提出来的，但他的工作却是对这个问题最早、最系统的阐述。气体的性质用气体粒子的运动来加以解释的理论，是 18 世纪已经研究得很多的理论，其中作得最好的有丹尼尔·伯努利，但是气体粒子的所谓“运动”论也不是一种与牛顿的气体“静态”理论完全相对立的理论，牛顿的定态理论认为气体粒子都处于稳定状态，亦即由于粒子之间的排斥力的制约而使各个粒子处在稳定的位置上。大约在 18 世纪 70 年代，精心建立的静态理论是为了确立与当时最盛行的不可称量流体理论之间的

相互关系。气体粒子之间的排斥力归因于不可称量流体中存在的热,后来称这种热流体为"热素"。气体的热素说直到19世纪50年代还是气体构造的主要观点,19世纪50年代的热素说才开始由热的波动理论或机械论所取代,尽管当时气体运动论是由约翰·赫雷帕斯(John Harapath,1790年—1868年)和约翰·詹姆斯·沃特孙(John James Waterson,1811年—1883年)首先提出的。在论述热功等当性的工作中,焦耳采纳了赫雷帕斯的气体粒子运动的观点,他指出,热取决于物体粒子的运动。克劳修斯从建立热功等当性的过程中也得到了类似的结论,并且还受到奥古斯特·克朗尼克(August Krönig,1822年—1879年)的一篇文章的启发,这篇文章提到用概率论来处理气体粒子运动的问题。克劳修斯是在1857年发表他的第一篇关于气体运动论的文章的。

克劳修斯在讨论气象光学过程中已经用到过概率的论证方法。他把天空的蓝色解释为光从大气中漂浮粒子的反射所产生的结果,他还使用统计论证证明他所描述的粒子运动的平均值是正确的。他相信热是由分子运动引起的理论,他在描述粒子运动时用统计论证,提出了由克朗尼克论文掀起的有益的理论框架。克劳修斯假定气体粒子可被当作刚球看待,并且认为粒子碰撞的时间间隔可以忽略,而且分子之间的力效应在描述气体分子的运动和碰撞时是可以忽略的,证明可以用气体分子的能量来表述其温度,他强调指出他的分子速度的数值只是一个平均速度。各个分子的速度都可能与这平均值不同。

在气体分子运动的理论阐述中,这种同概率论证相关的看法,在此后的一篇文章中又得到了进一步的发展。在回答他的理论不能解释气体分子的慢扩散的批评时,克劳修斯引用了一种更加复杂的分子模型,去解释气体分子的运动和相互作用。他强调指出,如何确定气体粒子碰撞时分子间的作用力是相当重要的。他根据分子力的传统概念证明当分子彼此相距很远时分子力互相吸引,当彼

此很紧时表现为斥力。分子吸力和斥力平衡时的间距即为分子的“作用球”半径。当两分子相遇时，作用球的大小取决于分子间的相互作用是否按平方倒数互相吸引或互相排斥。克劳修斯引进了一个重要的新概念，即“自由程”，平均来说，这是当一个分子运动到另一个分子的作用球之前其引力中心所走过的距离。距离达到了这一值时碰撞发生。他得到了平均自由程与作用球半径比值的表达式，不过并没有得到这个量的数值表示式。克劳修斯将气体分子的运动当作随机过程看待，运用概率论方法讨论分子间发生相碰的情况。

麦克斯韦在分析气体分子速度变化时，采用了更加复杂的数学方法。克劳修斯只是简单地考虑分子的平均速度，麦克斯韦想到需要采用关于速度分布的统计分析方法。在麦克斯韦对“气体动力学描述”(1860 年)的阐述中，速度的分布服从分布函数，这一方法同拉普拉斯对误差分布所用的分析方法很相似。麦克斯韦的理论是气体的动力学理论，后来他受汤姆孙和泰特的《论自然哲学》(1867 年)一书的影响，又把他的术语作了反复修改，改为气体的“运动”论，只关心粒子的运动和碰撞。麦克斯韦对气体分子论的兴趣完全是因为受到克劳修斯文章的感染，当然克劳修斯的工作奠定了最初的基础。麦克斯韦的兴趣完全放在对粒子碰撞的数学分析上，而且促进了概率论证的应用。在一篇论土星环的论文中，他证明了环是微小粒子的一种集结，他评论道，描述大量粒子之间互相碰撞的数学问题极其复杂，正如他后来观测的那样，数学处理是相当困难的，克劳修斯的工作为分析粒子碰撞提出了一种普遍的方法。麦克斯韦同样知道，19 世纪 50 年代时数学家和物理学家都对概率论的逻辑地位和数学地位很感兴趣，并且麦克斯韦原先对概率和粒子碰撞的数学分析结果解释了克劳修斯文章里所提出的问题。麦克斯韦特别注重物理类比的方法，他希望自己对粒子碰撞的处理方法完全与对气体的推测无关。论文以数学练习开头，根据这种练习引伸

出粒子碰撞时的数学假设，再将这种假设用于对气体性质的研究，这就像他通过对力线的几何想象来描述电磁学现象一样。尽管麦克斯韦的工作本来只是作为对粒子力学所作的数学描述，但在他发表的文章里已把这种描述变为描述物质分子性质的物理理论了。

麦克斯韦论文的中心是（根据气体分子可以当作刚性球的假设）讨论分子碰撞，以及根据气体平均自由程计算，对粘滞性、热传导和扩散等气体输运方程的推导。后来他又从实验上证明气体的粘滞系数直接随温度而变，这个结论同他的刚球分子模型是矛盾的。由此使他重新考虑他对分子结构问题的处理方法，麦克斯韦在“气体动力学理论”（1867 年）一文中对这一理论作了细致修正，这项修正是因克劳修斯对他从平均自由程概念出发的批评而作的，在导出速度分布函数和气体性质时，所作的假设如何就变得更为紧迫。麦克斯韦放弃了用平均自由程概念作为分析分子运动的手段，把分子相遇设想为“力心”，而不是刚球间的碰撞。他发现如果力心间的斥力定律是负 5 次方律，气体的粘滞系数就直接随温度而变，同他的实验结果一致。在他重新推导的速度分布律中，他考虑了分子碰撞对分布律的影响，得出了不随分子碰撞而变的分子速度平衡分布函数。

麦克斯韦的气体理论具有两个重点，一是分子的性质，二是分子运动的数学处理方法。在一次题为“分子”（1873 年）的演讲中，他研究了可以了解物质性质的信息证据，他观测到，气体运动论提出了两方面的证据，物质性质可由分子运动论给以解释，分子结构模型的构架形式亦可由气体运动论加以解决。此外，光谱学指出，振动的分子是光谱的根源，光谱学也是分子结构理论的基础。气体理论和光谱学两者的相互制约，为分子物理学的后续工作确立了大致的趋向。

建筑在‘统计’方法的解释基础上的麦克斯韦气体理论不同于根据‘动力学’方法得到的理论，后者只关心物质个别粒子的运动。

他指出,动力学方法或'历史'的方法并不完全满足气体理论,因为动力学方法需要用到各个分子运动的完整的数据。正如他在关于'分子'的演讲中指出的那样,即使用于实验的物质只是很小很小的一部分,也会有几百万个分子,每个分子的运动当然是观测不到的。分子物理学中的实验不可能'自夸绝对精确';实验只能提供大量分子集体的'统计信息'。麦克斯韦坚持认为,气体理论只能用平均值方法的概率或相对必然性去代替严格动力学方法所谓的'绝对'必然性。不管大量可变事件的平均是否稳定,在特殊情况下,与"平均值规则"所预计的极其不同的事件也有可能发生,虽然'我们心理上认定这样的事件是不会发生的'。因此,他极力将气体理论作为在统计方法上建立起来的理论,因此,它不同于个别分子运动的理论。正是通过他对分子运动论地位的反思,把它作为不可回复的统计理论,才使麦克斯韦确立了他的结论:热力学第二定律本质上是一种统计定律,它不可能表述为能描写个别分子运动的动力学定律。

分子结构的问题

麦克斯韦并没有把分子科学同"最终极原子"性质两者的讨论完全区别开来。他在给《不列颠百科全书》第九版所写的一篇题为'原子'的文章中指出,分子科学是关于物质性质的科学,也是关于物质粒子构造的论述;所谓物质的原子论,是指对物质和引力作出满意解释的理论。他所论述的涡旋原子论就是其中的原子论之一。作为物质的一种完整的理论,应当说明物质的不变性和产生引力的原因。与此形成对照的是,气体运动论说明了物质粒子的结构、分子性质以及分子运动的证据。麦克斯韦指出,气体运动论为建立物质分子结构模型奠定了基础。

正如麦克斯韦所认识到的那样,物质分子论面临的问题是:不

同的分子现象对建立分子结构模型所施加的限制往往是不同的。麦克斯韦从气体运动论导出的气体分子动能的数学结果为：动能在分子内部的机械运动中平均分配。这个所谓能量平均的“均分定理”，同气体热性质（比热）的实验结果是不一致的，这就说明分子的内部运动是受制约的。为了解释气体分子的结构，需要对分子的力学性质给予约束，却又同光谱实验不一致；光谱实验指出，光谱线是由分子内部的复杂振动形成的，因此又同分子内部所假定的限制相矛盾。说明气体分子论本身就是不完备的，而且气体运动论和光谱学两者得到的证据也是冲突的，因而建立的分子模型必须符合理论和实验两方面的要求。

麦克斯韦得到了能量均分定理，通过对分子模型的讨论得到了解释气体性质的办法。根据分子模型，分子内部的运动是受到制约的，但他看到了解决问题的困难所在。不管是否认识到与均分定理有关的问题，不少物理学家都利用均分定理来讨论分子的内部结构。为了尽量与气体性质一致，需要构想各种机械运动，因此提出了多种多样的分子模型，有些理论是相当成功的。水银蒸气的实验表明，水银是单原子的，这也与麦克斯韦的理论论证是一致的；在19世纪90年代，约翰·威廉·斯特拉特（John William Strutt，1842年—1919年），亦称瑞利勋爵，得出氩气体是单原子气体，利用均分定理得到的结果完全支持他的结论。但是物理学家都认识到，要建立完全符合实验结果的满意的分子结构模型是相当困难的。

光谱学又向均分定理提出了严峻的挑战。大约19世纪60年代讨论光谱性质时已经知道分子物理学还存在问题，对线光谱的出现，亦即对太阳光谱中所出现的暗线，早在19世纪之初已着手讨论，约瑟夫·夫琅和费（Joseph Fraunhofer，1787年—1826年）也作过详细的描述。化学物质放到火焰上所产生的火焰谱线与夫琅和费线之间的关系，也有过广泛的讨论。早在19世纪50年代后期，罗伯特·本生（Robert Bunsen，1811年—1899年）和哥斯塔·罗伯特·基尔

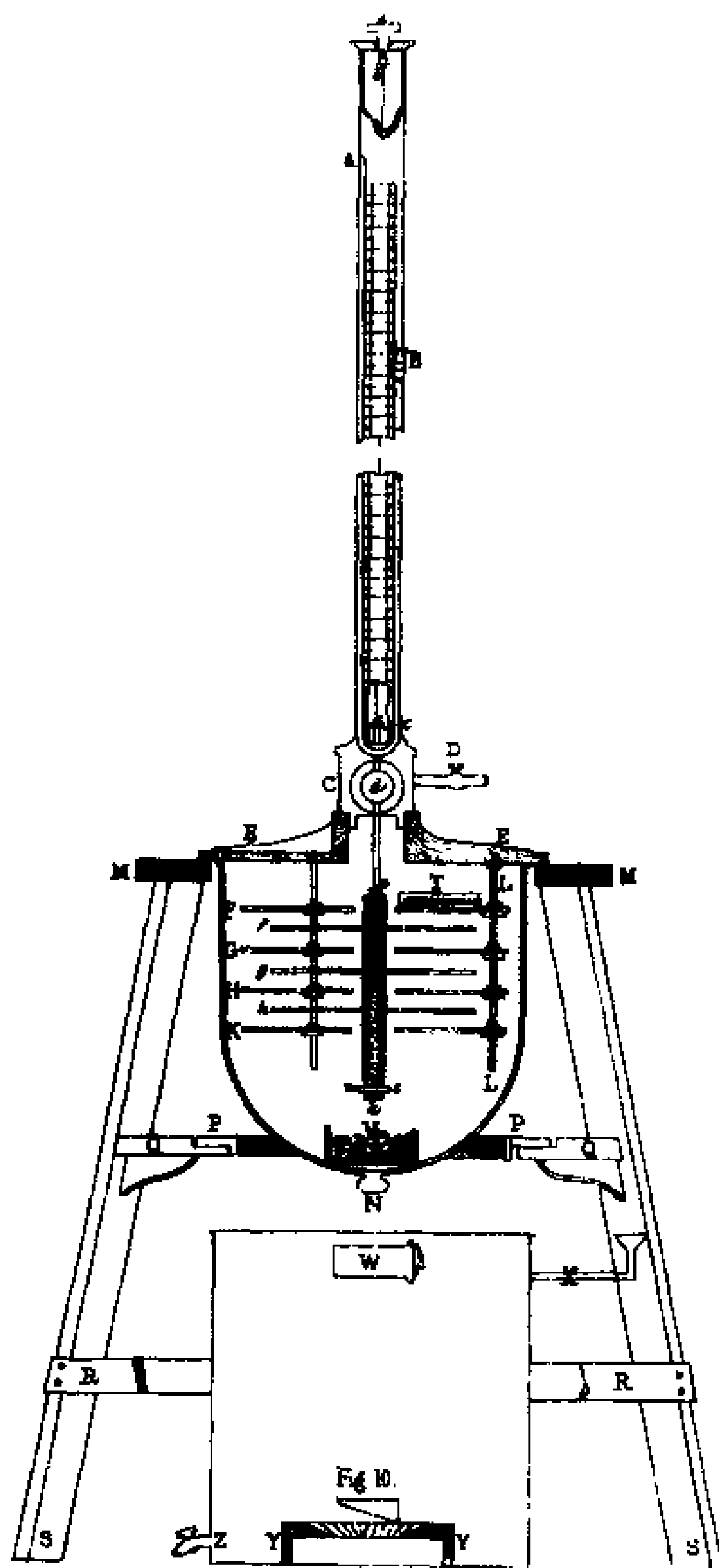


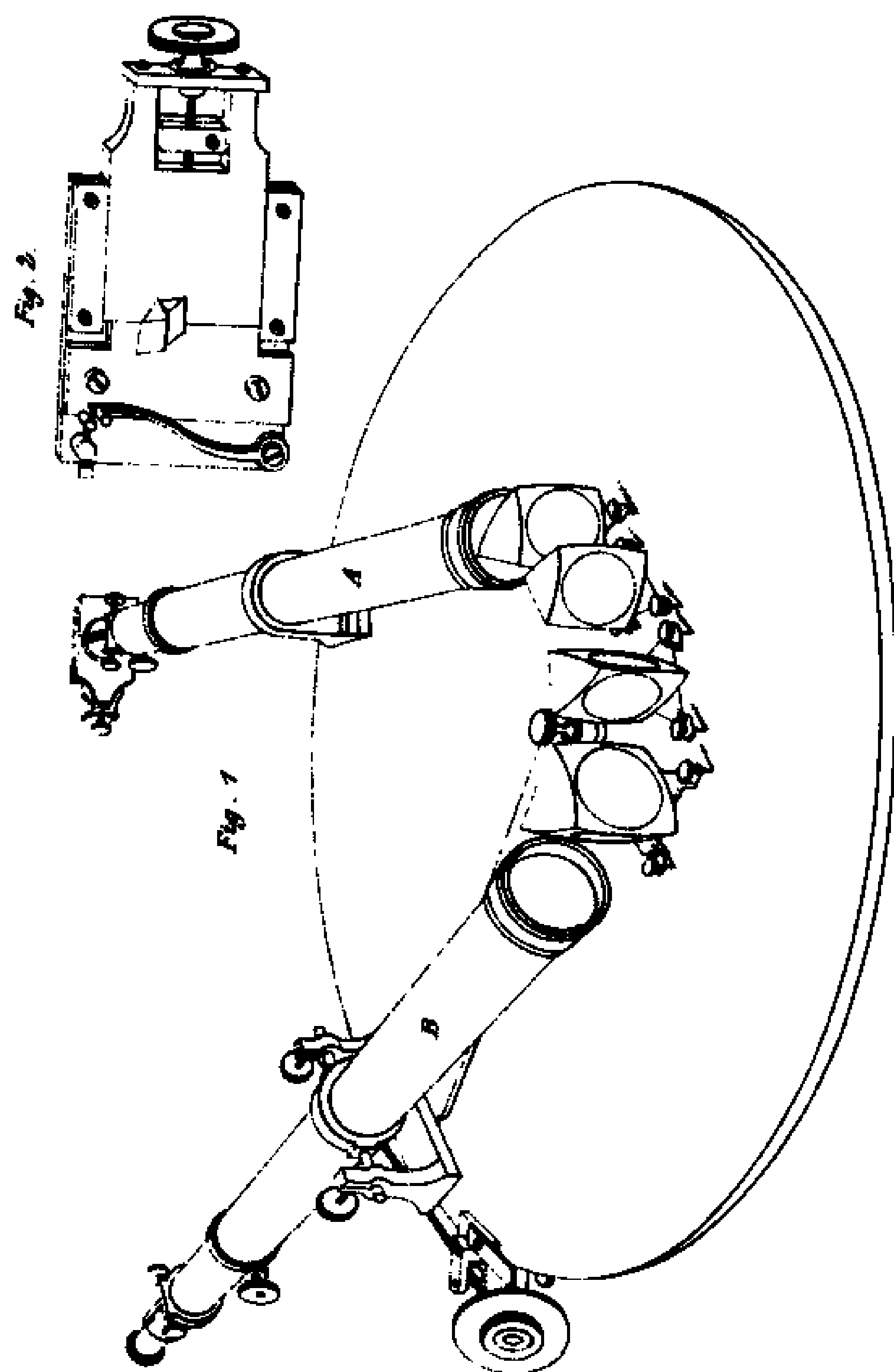
Fig 10.

霍夫(Gustav Robert Kirchhoff,1824 年—1887 年)都记录过不同化学元素的特征谱线。在 1859 年发表的一篇文章中,基尔霍夫确立了太阳谱线和火焰谱线两者明暗谱线间的对应关系。他指出,化学元素既能辐射也能吸收相同波长的光。太阳光谱中的暗线是由处在太阳大气中的元素对太阳光谱的选择吸收造成的。光谱学引起了化学家的高度重视,因为它提供了一种化学分析的方法,还激发了人们对化学元素的性质作出推测。

整个 19 世纪中,化学家们广泛争论的,是元素的高度复杂性问题。威廉·普劳特(William Prout,1785 年—1850 年)指出,氢是'一号元素',其他元素都由它所组成,他还指出所有其他元素的原子量都是氢原子量的整数倍。尽管这种说法只是一种近似的说法,很显然,普劳特的观点还是有争议的。早在 19 世纪 70 年代和 80 年代,当人们在讨论光谱学所隐含的化学意义时,曾作过一些猜测。对星际光谱的分析指出,最热星体的光谱中发现了最轻气体元素的谱线,而较冷星体则含有较高比例的重金属元素的谱线;从这种分

图 5.2　麦克斯韦夫妇用来测定气体(作为压强函数的)粘滞系数的实验装置(1866 年)。实验的关键是:观测悬挂在密封腔中的玻璃圆盘 f、g、h 的振荡。腔体中气体的压强是可以改变的,并由气压计 ACB 读出。腔体的温度可随置于下端锡罐中(图 10)的热水、蒸气或冷水的情况而改变,锡罐的高度可以调节,调到最高点时,可能封住实验腔,温度由温度计 T 测出。在玻璃圆盘的主轴上粘有磁化钢条 ns,并将磁铁放在 N 之下,麦克斯韦再让圆盘转动起来。

麦克斯韦在他的 1860 年的文章中,导出了气体输运的粘滞系数、热导率和扩散系数的表达式,他的目的是要用实验证明他的理论结果:粘滞系数同气体压强无关,这是由气体运动论得出的结果。但是粘滞系数同温度的关系则由假设的分子模型所决定。麦克斯韦指出,刚球分子的气体,其粘滞系数随温度的平方根而变。他的实验结果表明粘滞系数直接随温度而变,刚球分子假设与该结果不符。这些实验促使麦克斯韦重新考虑气体分子的结构特性。于是,他在 1860 年的文章中抛弃了刚球模型,并采用了'力心'的分子理论。[资料来源:Maxwell, *Scientific Papers*, 2:24,Pl.Ⅸ figs.1,10]


Fig. 2
Fig. 1
A
B

析可以得到化学元素如何演变的假设:由于星体中轻元素的冷却和凝结,使化学元素从简单物质演变为复杂物质。虽然元素的这种演化历史和相应的复杂性仍然只是猜测性的讨论,但在对化学元素的研究过程中,光谱分析的确是一种不可多得的手段,通过这一技术,我们方能洞察分子的结构。麦克斯韦认识到光谱学对分子物理学的影响深远,他认为光谱线是分子振动传播给以太所造成的结果。假定分子就像钟一样振动,那么钟的旋律就相当于振动分子所产生的谱线。在19世纪80年代,物理学家提出用分子模型去解释光谱,阐明从光谱分析可以得到分子内部振动的信息。人们认识到,要能产生确切的振动谱线,其分子模型一定极为复杂,并一定不符合均分定理,这也表明分子的力学结构是有限制的。相反,符合均分定理的分子结构又过于简单,以致不能产生化学元素谱线中所观测到的谱线。为了解决这些困难,拉莫尔,菲茨杰拉德,以及阿瑟·舒斯特(Arthur Schuster,1851年—1934年)提出采用电磁学理论,亦即利用电子的振动来解释所产生的光谱。

均分定理本身又一次作了细致的分析。W·汤姆孙试图说明,

图5.3　基尔霍夫测定光谱线的实验装置(1861年)。基尔霍夫利用这一装置,能够把太阳光谱中的暗光谱的"夫琅和费"线同元素的光谱线进行比较。太阳光谱由望远镜和棱镜系统(图1)给予观测,望远镜 *A* 的目镜用一条狭缝来代替,分度尺与测微螺杆相连,望远镜 *B* 可由螺杆转动,以便测出各条谱线间的间距。因此,元素的光谱可以直接同夫琅和费谱线进行对比,基尔霍夫采用了如右上角附图所示的棱镜系统,火焰谱线可从上半条狭缝进入,同时太阳光则从下半条狭缝进入。基尔霍夫研究了钠光谱的明亮线与太阳光谱中两条特强谱线(按照字母规则标记为D线)相互重叠。他证明,D谱线是钠的选择性辐射产生的谱线,而且选择性吸收谱线的波长几乎相同。他指出,太阳光谱中的暗D线是因为从太阳热核溅出太阳大气层中的钠的选择吸收造成的。太阳光谱和星际光谱中的暗谱线,提供了太阳和星际的大气层中含有化学物质的证据。[资料来源:Gustav Robert Kirchhoff, *Unter-Sucbungen über das sonnenspectrum und die spectren der chemischen Elemente* (Berlin, 1861), pl. Ⅲ]

在希望保留物质分子论的前提下,均分定理是难以满足的。汤姆孙认为,遵照气体运动论的概念框架,如果要使均分定理适用,建立分子结构的力学模型简直不可能。瑞利对这一问题的反应是,均分定理是气体运动论的必然结果。路德维希·玻耳兹曼(Ludiwig Boltzmann, 1844 年—1906 年)证明,均分定理是气体运动论的基本特征,他经过了不懈的努力,试图建立既能克服气体特性所产生的困难又能同均分定理相一致的分子模型。他将分子当作力学系统看待,在他看来,均分定理仍是最基本的性质。

分子力的讨论有利于回避由均分定理所产生的困难。克劳修斯早在 1870 年就打算用力学原理去解释热力学第二定律,他导出了一个与热量和温度有关的力学定理。这个所谓的"维里定理",把分子的动能与分子之间的作用力联系了起来。1873 年,J·D·范德瓦耳斯(Johannes Diderik van der Waals,1857 年—1923 年)应用这个维里定理去研究气体的性质。麦克斯韦看到,范德瓦耳斯对分子力的研究,还可以进一步发展为研究物质性质的手段,这种方法又进一步促进了对分子力和分子结构的,况且这种研究又不涉及到均分定理。

尽管物理学家为了回避光谱学和气体运动论两者互相冲突所产生的矛盾而采用了另一种方法,但分子物理学的问题仍未得到解决,均分定理的地位也难以确立。1900 年,W·汤姆孙把这种状况描述为:"热和光的分子理论的光芒被两朵乌云遮住了"。不过汤姆孙的结论是:使力学自然观协调一致起来的最简单的方法也许是抛弃均分定理,而玻耳兹曼则阐明:均分定理是气体运动论的核心,正是它确立了力学自然观在概念上的协调一致性。

分子物理学和热力学

克劳修斯为了奠定热力学的力学基础,曾经不断地使他的气体运动论更加具有条理性。麦克斯韦和玻耳兹曼为了讨论热力学第

二定律和力学解释原则的关系问题,开始探索气体分子运动的统计理论的意义所在。麦克斯韦在1867年写给泰特的一封信中开始讨论这一问题,他提出了一个较热物体在没有外界对系统作功的情况下能从较冷物体提取热量的办法。麦克斯韦考虑处在两个由隔膜分为两部分的容器中的气体A和B。设气体A比气体B为热,虽然麦克斯韦的速度分布律表示气体A和气体B的速度分布范围都是相似的,但A的温度较高,表示A中气体分子的平均动能比B中的要高。然后麦克斯韦设想一个所谓的'管制的生灵'(后来W·汤姆孙称其为'妖'),他能观测到一个个气体分子的运动和速度。这个'生灵'还能开启或关闭膜上的小孔,又能让分子从A或B交替地穿过小孔,还能挑选分子,因而B中较快的分子将进入A中,而A中的较慢分子进入B中。这个过程的结果是:'A中的能量增加而B中的能量减小,亦即较热的系统更热而较冷的更冷了,但过程中始终没有做过功,唯一用到的是极端聪明的观测者和手指灵巧的精灵'。

这一纯粹推理论证的目的并不是想用这种方式来判断操纵个别分子的物理可能性,因而有意去违反热力学第二定律;热力学第二定律断言:没有外界对系统作功,热不可能从较冷物体流到较热物体。麦克斯韦也不是异想天开要让这个奇怪的精灵以这样的方式来操纵分子。他反对汤姆孙用术语'妖',极力赞同泰特的'不再称它为妖而只不过是一个阀门'的说法,这里的论证也绝没有任何超自然的腔调。麦克斯韦的目的是要表明:热力学第二定律是描述含有大量分子系统性质的一个统计规律,它不能描述系统中个别分子的行为。尽管'管制的生灵'具有'敏锐'的本领,需要他来观测热量从较低温物体流向较热物体的违背热力学第二定律的事实,但这个过程从分子水平上看是可能自发发生的。由于分子的随机运动,个别分子的自发涨落的持续会出现使热量从较冷物体传输到较热物体。这种随机涨落并不会构成对热力学第二定律的否定,因

为第二定律所描述的是可观测的热流而不是分子的随机涨落。正如麦克斯韦对泰特所表明的那样，他的目的是'证明热力学第二定律只具有统计的确定性'。'妖'佯谬说明气体中分子速度按统计方式分布以及强调由大量分子组成的系统中自发涨落存在的必然性；因此，'妖'佯谬表明了热力学第二定律本质上的统计属性。

麦克斯韦在 1871 年出版的《热理论》一书中阐明了对'热力学第二定律局限性'的看法，并且进一步强调了他的论证的本意。他强调指出，如果存在某种违背热力学第二定律的可能'机制'，那就没有什么东西会与力学定律和能量守恒定律不一致的了。因为这种'机制'可能'引导和控制'分子的运动，于是违背热力学第二定律却符合力学定律，因此热力学第二定律决不是'动力学'定律，动力学定律可以描述个别分子的运动，因而物理学家们不得不采用'统计方法计算，而放弃严格的动力学方法'。

麦克斯韦论述的主要宗旨是，对热力学第二定律的任何分子解释都必须建筑在由大量分子运动的统计分析的基础之上。而想在个别分子的运动理论基础上对热力学第二定律作动力学解释是不可能的。虽然麦克斯韦并没有想建立热力学第二定律的系统的统计理论，但他强调了在热力学的概念基础上把统计解释和动力学解释区别开来的重要性。他不赞成克劳修斯采用将熵解释为分子排布不喜欢有序化的说法，亦即不同意把热力学第二定律归结为一种分子布局的理论。他反对克劳修斯和玻耳兹曼对热力学第二定律作出动力学解释的尝试。早在 1866 年，玻耳兹曼就把热力学第二定律概念上的模棱两可性同能量守恒定律的明确性作了鲜明的对比。玻耳兹曼的目的在于为热力学第二定律得出一个普遍的证明，并希望发现'与热力学第二定律相应的一个力学定理'。虽然他并没有得到完全普遍的证明，但他得到了熵的动力学对应物，当然克劳修斯在 1871 年也得到了这一结果，但克劳修斯是用无序化的术语来表示的。麦克斯韦认为这项工作基本上是难以置信的：热力学

第二定律是一个不可约的统计定律。

到了19世纪70年代初,玻耳兹曼自觉地采纳了这样的看法:热力学第二定律是一个统计定理,它不可能作为严格的动力学定律推导出来。随着他对麦克斯韦气体理论的深入研究,玻耳兹曼发表了一系列论文,采用速度分布律对热力学第二定律作了系统的统计论证,因而进一步完善了麦克斯韦关于分子运动的统计理论方法。在他于1872年发表的一篇讨论气体分子热平衡的主要论文中,他对麦克斯韦分布律的唯一性作出了普遍的论证,指出,不管气体初始状态如何,麦克斯韦速度分布律都满足其平衡态分布。玻耳兹曼还导出了不可逆过程中孤立系统熵增加的公式。这个后来被称为'H定理'的结果,利用了分子运动的统计分布律去建立熵的不可逆增加的理念。因此,玻耳兹曼利用分子运动统计分析完成了热力学第二定律的建立。

不过在这期间,玻耳兹曼并没有意识到热力学第二定律本质上是自然界的统计律。他的H定理的公式断言,不可逆过程中熵必定增加,熵的增加是用必然性而不是用概率来表示的。问题的争论点是不可逆性的概念处于何种地位的问题,亦即动力学定律究竟与由热力学第二定律所断言的自然过程的不可逆性存在着什么样的关系问题。玻耳兹曼面临的困难是如何回答由约瑟夫·洛施密特(Joseph Loschmidt,1821年—1895年)提出的批评。洛施密特的论述(后来被称为'不可逆佯谬')指出,不可逆性作为自然界的基本特性只是偶然的,并不是必然的。一个粒子体系当它朝平衡态方向演变时应当伴随着熵的增加,由于粒子的运动与时间无关,从平衡态向不太均匀状态演变的时间反演也可以伴随着熵的减小。玻耳兹曼为了明白无误地阐明自己的看法,有意拓广了洛施密特的简洁陈述,强调指出,熵的不可逆增大并不能从力学定律导出,因为粒子的运动方程不受时间反演的影响。

麦克斯韦私下里讨论过这个问题,这从他在1870年写给J·W·

斯特拉特(Strutt,后来称瑞利勋爵)的信中可以看到:一切事物的时间反演都与动力学定律一致,但与热力学第二定律并不一致。麦克斯韦得到的结论是:由热力学第二定律断言的自然过程的不可逆性并不能用动力学原理给出解释。在讨论洛施密特佯谬时,玻耳兹曼均采用熵和不可逆性的统计解释。他注意到热力学第二定律和概率论间的密切联系,并对熵的解释作了修正。承认某种想像的过程熵减小的情况也是可能的,但他论证指出,这种情况并不违背热力学第二定律所断言的不可逆性的概念。由于熵增加本质上是一个统计规律,因此不可能证明熵增加是"绝对必然的"。虽然熵减小的过程是"几乎不可能的",但决不能说是"绝对不可能有的"。

玻耳兹曼在发表于 1877 年的一篇重要论文中,论述了热力学第二定律同概率论的关系,通过说明熵和系统分子的可能排布之间的关系,扩充了熵的解释含义。他把热力学第二定律定义为统计规律,系统的熵则是它的概率的量度。在自然过程中,熵的增加相应于系统朝最可几的分子排布演变的倾向。因此,热力学第二定律指出,自然过程的不可逆性是系统朝最可几热力学状态(即热平衡态)的演化结果。因此,自然界熵的不可逆增加是以无法回复的统计规律为特征的。

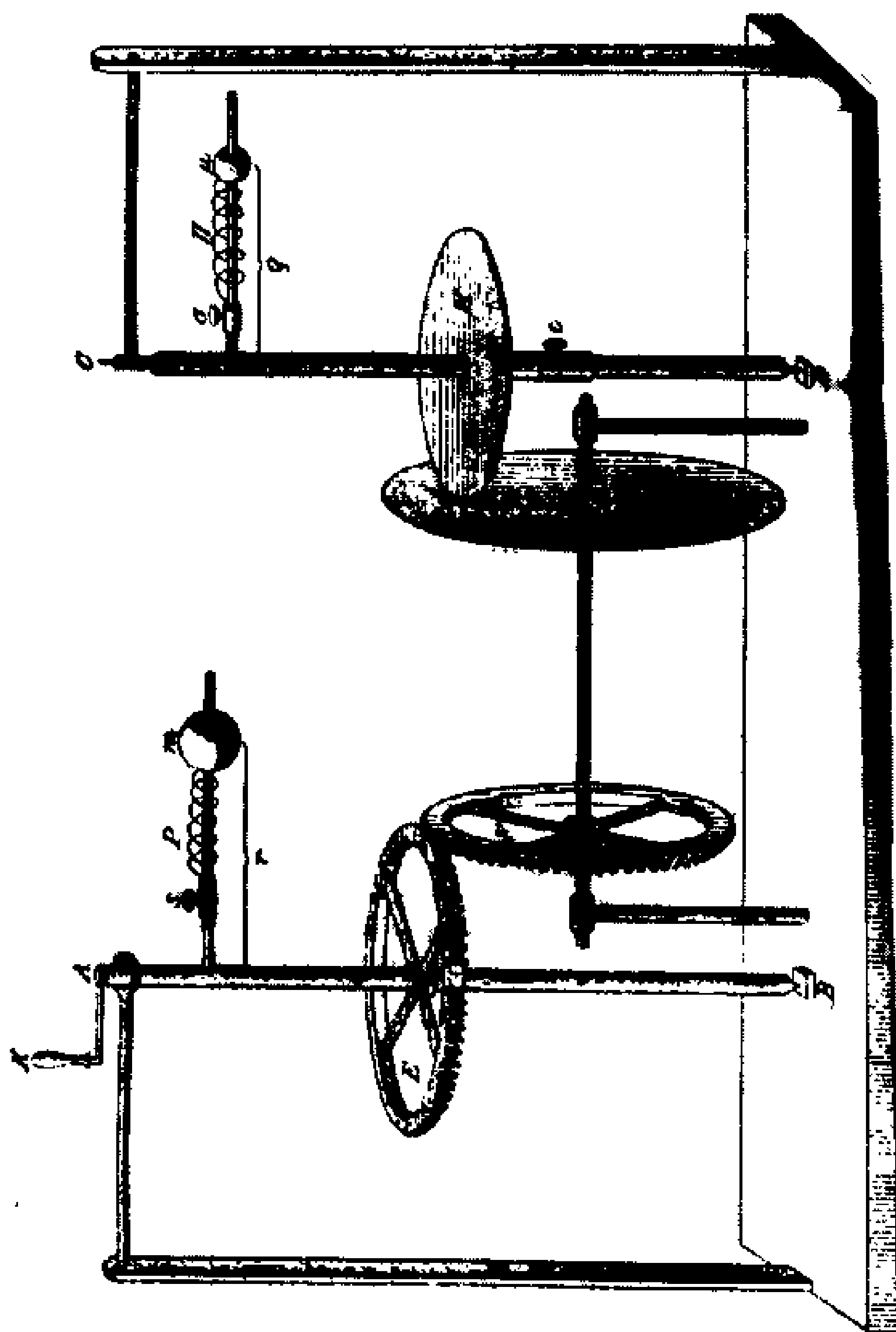
玻耳兹曼相信,从分子运动的统计理论出发建立熵和不可逆性的概念,使他在力学自然观的本体论的框架内建立了热力学第二定律。正如能量守恒定律是用分子运动能量的术语,在力学原理的基础上建立起来那样,热力学第二定律也根据分子运动的统计理论术语,在力学自然观的框架内建立了起来。

化学热力学和唯能学论

在 19 世纪 80 年代和 90 年代,玻耳兹曼在分子运动的统计理论基础上研究热力学受到了挑战。马克斯·普朗克(Max Planck,

1859年—1947年)在1891年的一次讲演中阐明了在将分子运动的统计理论同热力学概念联系起来的尝试中遇到的困难。问题是气体运动论产生了均分定理难以克服的困难,玻耳兹曼的分子概率理论引起令人生畏的数学复杂性,难就难在对气体运动论很难作详尽描述。普朗克相信,麦克斯韦和玻耳兹曼的工作是物理学家所能做到的关于分子运动论的最透彻的分析工作,从他们的工作中看到,理论的成就同建立该理论所使用的物理和数学方法还不大相称。普朗克对用分子运动的统计理论去解释热力学的概念表示怀疑,亦即向玻耳兹曼的自然观提出了挑战。同玻耳兹曼方法表现出的模棱两可不同,普朗克并没有顾及分子运动论,只是利用了理论家们所使用的能量和熵的概念所取得的成就。他指出,化学热力学的发展,诸如J·W·吉布斯(Josiah Willard Gibbs,1839年—1903年)的工作那样,是应用熵和能量去研究化学的过程。在1876年发表的文章中,吉布斯已经用能量和熵的概念建立了系统的热力学平衡概念,他还将这一概念应用到化学平衡的问题中。亥姆霍兹和普朗克将熵的概念应用于包括化学反应在内的化学热力学工作所取得的进展,为热力学提供了不同于玻耳兹曼的熵解释的另一种依据。

反应机制的讨论使19世纪化学争论的核心问题发生了变化。早在18世纪,人们已用化学亲和力的理论去解释化学反应,但是虽然贝陀莱(Berthollet)将亲和力的理论变成为更加定量化的化学理论,而且他也对反应机制作过研究,不过工作似乎并不复杂。道尔顿的化学原子论强调了粒子重量的定量性质,提出了合理的化学定比定律,还得出了另一种似乎更加适合于作为研究化学物质基础的规律。贝陀莱认为化合物是以一个非明确的配比关系构成的,亦即化学粒子的结合是受化学亲和力支配的配比关系决定的,这同道尔顿的配比关系理论不同,道尔顿理论很快就为化学家们所采纳。道尔顿的工作使化学的研究重点从对反应机制的研究转移到对结合比和原子量的研究。



到了19世纪50年代，人们对贝陀莱的看法产生了新的兴趣。反应热的测量促进了对反应机制和化学平衡的研究工作，而且气体运动论的发展提议用粒子运动的模型，而不是用静态吸引力去解释化学反应，亦即如何为化学反应提出更加令人满意的物理模型。具有非明确配比关系的化学溶液的性质，也成为研究的课题，贝陀莱的亲和力理论促进了对化学平衡问题的讨论。对化学反应热效应的研究也为化学反应提供了很多信息。到了19世纪80年代，在吉布斯、亥姆霍兹和普朗克的研究工作中，热力学的概念也被用来研究化学过程。化学反应的机制、化学亲和力的性质、化学平衡的理论以及化学反应的方向等等，都被纳入热力学解释的框架之中。

图5.4. 玻耳兹曼用来说明热力学第二定律所用的机械模型（1884年）。这一模型是亥姆霍兹于1884年构想并用于论证时的象征性解说，根据热力学第二定律的涵意，热转变为机械功是有限度的，这就是说在一个循环过程中，物体的热量可以转化为功，热则从较热物体传到较冷物体。亥姆霍兹指出，气体分子的运动好比轮子绕固定轴的转动，轮子的能量只取决于它的角速度。如果机械元件再接到轮子上，系统的能量也可能还与其他的坐标有关，并且其他坐标的改变速率又会比转速慢得多。亥姆霍兹指出，用轮子动能的变化来表示以热的形式向系统提供能量，这一能量又可用机械系统的其他参量（相当于气体的体积）的缓慢变化来表示。虽然亥姆霍兹承认对热力学第二定律的力学解释不能得出任何结果，但他断言，从力学系统的方程出发，他已得出了热力学的力学对应物。

利用机械模型来说明亥姆霍兹的论证，玻耳兹曼探索了热力学的亥姆霍兹力学对应物的含义。大约到1877年，玻耳兹曼已经完成了热力学第二定律的完全统计解释，在精心论述热力学的亥姆霍兹力学解释的过程中，玻耳兹曼并没有根据自己的观点，把这种力学解释又作为不可约的统计规律看待。他希望运用力学类比方法来分析热力学系统之所以出问题的一种研究方法，比方说在分子水平上把热和功区别开来，玻耳兹曼还强调亥姆霍兹的系统分子坐标（相当于热量）和缓慢变化的参量（相当于功）两者的差别。[资料来源：Ludwig Boltzmann, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, ed. F. Hasenöhrl, 3 Vols, 3: 143 (Leipzig, 1909)]

19世纪80年代,'物理化学'这门新颖学科一出现,便同化学热力学的进展,特别是同溶液理论的研究工作联系了起来。J·H·范特霍夫(Jacobus Henricus van't Hoff,1852年—1911年)证明:稀溶液同气体相似,因而提出了对溶液化学采用热力学的描述办法。S·阿累尼乌斯(Svante Arrhenius,1859年—1927年)把溶液理论用于化合物离解为荷电'离子'的电化学研究,使离解度同稀释度联系了起来。F·W·奥斯特瓦尔德(Friedrich Wilhelm Ostwald,1853年—1932年)已拓宽了这些观念,这些化学家在将离解概念和气体与化学溶液比较的基础上,发展起系统的溶液理论,他们注重热力学概念在化学过程中的应用。这种研究过程奠定了他们的物理化学的基础。

奥斯特瓦尔德试图将这种热力学方法推广为普遍的所谓'唯能论'的理论,企图说明用原子论概念去解释热力学是行不通的。他指出,物理-化学科学未来的任务就是发展能量的概念。只有能量才是自然界中唯一真实的实体,物质是衍生的,只是能量分布的一种表述方式。奥斯特瓦尔德反对在化学中用到原子的概念,他也否定与此相关的概念,即否定气体运动论,他反对在物理学中运用力学解释纲领。尽管普朗克批评过玻耳兹曼把熵的基础建筑在分子运动的统计理论上,但他也反对奥特斯瓦尔德对能量概念的看法。奥特斯瓦尔德认为熵是表示能量散失的一个量,但普朗克明确指出,热力学第二定律不可能用能量概念加以解释。根据他在论热力学方面的著述中,普朗克努力说明熵在概念上的地位,强调指出,熵对不可逆性的描述是至关重要的,熵对说明自然过程的方向也很关键,他不是根据分子运动论去寻找对熵的解释。在反驳奥斯特瓦尔德的论争时,普朗克指出,解释不可逆性的任何努力,都必须在不可逆过程中把初末两态的熵的数值区别开来。

玻耳兹曼和普朗克都一致认为,奥斯特瓦尔德的'唯能学'不能就熵的特殊重要性作出充分的说明。当玻耳兹耳持续不懈地将熵和不可逆性作为本质上的统计概念来加以解释时,普朗克却批评了

熵的概率解释。在19世纪90年代发表的热力学论述中,他提出了热力学第二定律具有绝对的确定性的看法,并以此回避熵的统计解释。但是普朗克并没有放弃力学自然观的本体论解释。他指出,气体运动论和分子运动的分析研究,原则上对热力学过程作出了完美的解释。但是由于玻耳兹曼统计理论遇到概念上的困难而使普朗克宁愿采用熵的纯热力学解释而不愿采用统计解释,无论如何,普朗克最终还是认同了玻耳兹曼对于熵的看法。作为他对不可逆辐射过程的研究结果(这导致他于1900年引入了量子论),普朗克承认了熵的概率解释,最后他甚至抛弃了原来认为热力学第二定律服从绝对有效性的原则,接受了玻耳兹曼认为这个定律属于完全的统计律的观点。

热力学定律和分子运动的统计理论两者之间的关系问题,一直是争论不休的课题。吉布斯在1902年所写的《统计力学基本原理》一书对这场争论作了回顾,他强调指出,关于分子作用机制和物体构成的假设性描述,形式上完全不同于热力学定律的表述。他用分子运动的统计理论来处理热力学的基础,利用这种途径找出热力学的类比特性。阐述分子运动的'统计力学'的建立,使热力学纳入力学自然观的概念范畴之内,得出了热力学概念的分子对应物。吉布斯在比较热力学定律和它们的分子对应物两者间的差异后断言:热力学可以在力学自然观的本体论范畴内加以解释。

第六章
跋：力学世界观的衰落

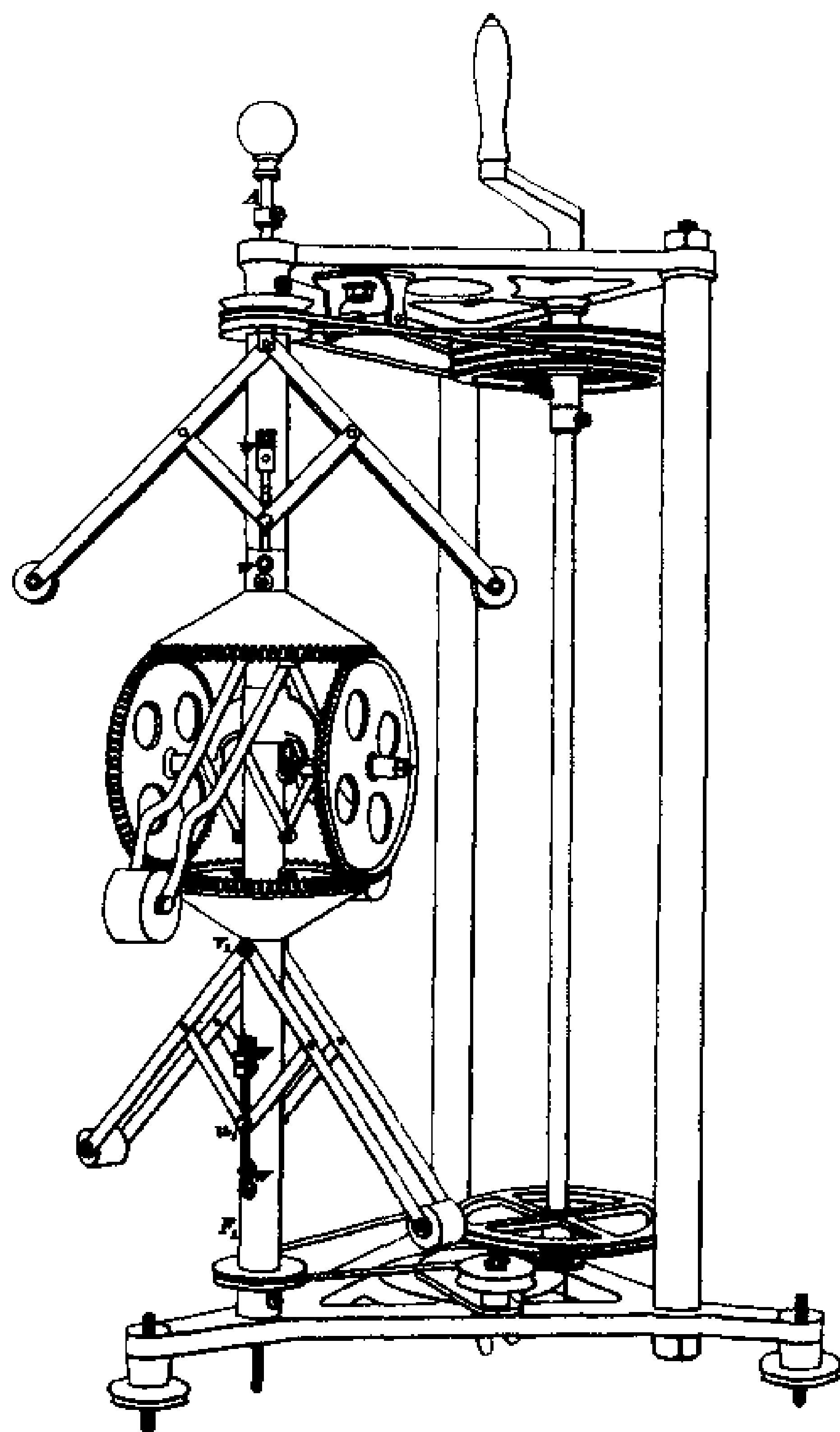
W·汤姆孙在 1900 年的一次题为‘飘浮在热和光的动力学上空的 19 世纪乌云’的演说中指出：力学自然观面临着两大难题，一是不能解释地球穿过以太的运动机制；二是能量均分概念提不出分子模型的构造。汤姆孙强调指出，正是这两朵‘乌云’妨碍他对物理现象提出力学模型，但是由于这两大难题所涉及的范围比较广泛，留给物理学家围绕力学自然观的概念基础所能想象的空间也比较大。

传统的力学解释纲领在 19 世纪 80 年代和 90 年代已引起物理学家们多种多样的反响。汤姆孙的以太模型和玻耳兹曼关于场论的演讲，都是尽量把现象的模型精雕细琢，千方百计维护力学纲领。玻耳兹曼尽心尽力地对他的电磁场的力学模型的结构和运动作出了极其细致的描述；而汤姆孙指出，现象的力学模型的结构如何是关系到对该现象易于理解的重要判据；但是与力学模型相关的概念困难已被深刻理解。麦克斯韦指出，这样的模型并不能对现象作出唯一解释，模型本身也使人注意到，所描述的现象又同实际情况不完全一致，并且尽管他本人试图完成建立场的‘完整’力学理论的最终目的，但在论著中他宁可采用动力学解析形式而不采用具体的力学模型。拉莫尔坚持认为，这一解析形式已对电磁场的力学

结构作出了很好的解释,而且他还建立了一种能将以太的电磁性质和力学性质完全统一起来的以太媒体理论。根据拉莫尔理论,电子是在赋予动力学性质的以太中转动应力的中心,电子又是最基本的电磁学实体。

赫兹也相信力学解释纲领,强调他的以太概念是建立在以太各局部之间由机械结构相连的模型之上的,但由于他把电磁学的形式同由力学模型描述的形式小心地区别开来,这就促使他产生了电磁场不具有力学性质的观点。在他的关于电子论的首次描述中,他把电磁场想像为动力学系统,但是他最后还是放弃了与解析动力学相关的形式,而是朝着非力学原理范畴建立电子和电磁以太本体论的方向前进,而他的电磁以太理论不是建立在力学纲领的基础上。根据电磁世界观,物质的力学性质则是建筑在电磁以太性质的基础上的。能为物理学提出最基本的统一框架的,是电磁学概念而不是力学概念,这就是除洛伦兹以外的物理学家们在1900年左右的普遍看法。洛伦兹从自己的电磁学自然观出发,解释了地球通过以太的运动,这也是回避弹性以太的力学理论所面临的困难的一种表述方法。

围绕场论机制的争论与围绕热力学的争论如出一辙,玻耳兹曼竭尽全力要维护力学自然观的地位不可动摇,他提出的分子结构模型与均分定理是一致的,他的这种努力,使人们相信在力学自然观的范畴内气体分子运动理论在概念上与力学协调一致。用分子运动的统计理论建立起熵和不可逆性的概念之后,玻耳兹曼用力学自然观的本体论解释了热力学第二定律。普朗克在对玻耳兹曼用分子运动的统计分析去解释热力学的概念提出质疑时,指出玻耳兹曼的工作所产生的困难。尽管普朗克并没有完全否定机械论的本体论,但他试图以纯热力学来解释熵。不过唯能论是反对机械的物理本体论解释的,同时也否定力学模型的假设,他们希望把原子论的概念从物理的理论范畴中清除掉。



由于均分定理和以太模型结构等相关问题（亦即汤姆孙所谓的力学自然观上空的两朵‘乌云’）的出现，围绕着物理学大厦基本框架的争论就越来越突出了。在关于力学纲领是否应由电磁学本体论替换的争论中，洛伦兹曾想通过改造电磁学物理去解释地球通过以太的运动。虽然玻耳兹曼经过种种努力想使能量均分定理符合气体运动论，进而又同力学本体论一致，但他并没有解决如何建立符合这一要求的分子结构模型的问题，能量均分定理的地位不稳也动摇了气体运动论的协调一致性。因而作为物理解释根基的力学纲领的地位也极不稳固。赫兹一直坚信机械论的本体论是正确的，但是他建立的场论方程与力学解释毫无关系，普朗克为熵寻求纯热力学解释的失败又加快了力学纲领的衰亡。力学解释的消亡是物理学理论演变的一个范例，深受对力学解释进行哲学批判者的支持。恩斯特·马赫（Ernst Mach，1838 年—1916 年）分析了力学史后提出了自己的观点：力学定律在物理学中并没有任何特殊的地位。他对力学解释能否深刻理解自然现象的必要依据的说法表示

图 6.1. 玻耳兹曼在关于麦克斯韦理论的演讲（1891 年）中，用来说明电路之间相互感应的力学模型。这是由玻耳兹曼首创的专门用来说明耦合线路之间互相感应的机械模型。电流和电路间的相互作用可由齿轮的转动来描述，电流的能量则由与圆盘转动相关的速度来解释。玻耳兹曼得出，他的力学体系的方程式和感应电路的方程式是完全一致的。他认为从拉格朗日动力学方程出发建立麦克斯韦理论是不妥当的，或者说，他对麦克斯韦在 1861 年的‘物理力线’一文中所假设的那种意想的模型很不满意。玻耳兹曼就是要用活生生的机械模型，十分仔细地说明模型的结构及其运动。通过机械类比的方法，清楚地说明麦克斯韦的电学理论具有发人深省的价值。为了说明两个电路间的电流互相感应，麦克斯韦本人也设计过一种机械模型，在坎培尔和盖纳特（Campbell and Garnett）合著的《麦克斯韦的一生》一书中，对麦克斯韦设计的模型作过描述，这种模型是麦克斯韦于 19 世纪 70 年代担任剑桥卡文迪许物理教授期间，在卡文迪许实验室制作的。［资料来源：Ludwig Boltzmann，*Vorlesunngen über Maxwells Theorie der Elektricität und des Lichtes*，2 Vols（Leipizig，1891 – 3）］。

怀疑，他论证指出，力学在物理理论中之所以占主导地位纯粹是一种历史的偶然。马赫将他对物理力学所作的哲学批判进一步推广到对原子论的抨击，他完全抛弃了机械论的本体论。他强调指出原子论只有假设的地位，原子只是描述现象的一种符号，决不是真实的物理粒子。

汤姆孙的两朵‘乌云’终于消散了，当然并不是通过他对力学物理机制的修正实现的。量子论是从气体运动论对原子结构所加约束的推断中分离出来的；阿尔伯特·爱因斯坦（1879 年—1955 年）提出的‘相对’论，认为对以太的需求是多余的。这些进展都是在 19 世纪 90 年代围绕对力学解释纲领的争论中取得的。普朗克在 1900 年引进的能量量子化，是他在对辐射过程的不可逆性的研究中得到的结果。在热力学理论应能很好地解释他的辐射过程却又无法对辐射过程提供纯热力学解释的情况下，普朗克引进了熵的统计解释，终于承认了玻耳兹曼对热力学第二定律所作的统计描述的办法。普朗克的辐射公式中还含有振子能量是分立的而不是连续可变的。普朗克引进的能量子是他在热力学研究工作中提出来的，这些工作是他在 19 世纪 90 年代的那场争论中起主导作用的过程中完成的，他寻求的是完成对熵作出纯热力学解释的目标。

爱因斯坦的目标很清楚，他要用自己的工作去解决力学世界观和洛伦兹电子论间的矛盾。爱因斯坦 1905 年提出的光量子假设，目的就是要解决电磁学和力学之间如何衔接的问题，从形式上将场论和粒子力学以及电磁学和气体运动学之间存在着的‘深刻差别’沟通起来。爱因斯坦抛弃了洛伦兹电子论中离散的电子和以太的所谓二元论，努力通过对光作粒子性假设，完成对电磁学世界观和力学世界观两者的统一。同一年里，他所发表的论‘相对论’的文章，他的打算扩大到要建立一种统一的物理学。理论的基本假设完全适用于力学和电动力学的普遍原理。他认为以太是多余的，应当抛弃，因此他极力否定电磁学的世界观；因此，他的理论常常被那

些坚信只有电磁学概念才能提供物理学的普遍基础的物理学家们贬低为力学原理或老式的。爱因斯坦受到马赫对力学物理学深刻批判的影响，他不打算把电动力学还原为力学，而是要把电动力学和力学都转变为更加普遍、更加基本的统一物理学理论。爱因斯坦在后来发表质能等价性的那一年中阐明，质量可被看作为能量的一种形式，这种质能等价性使物理学概念朝统一的方向前进了一步，奠定了电动力学和力学统一的物理基础。爱因斯坦试图通过对力学基本概念的修正，使之成为统一物理的基础，通过这一途径解决电磁学世界观和力学世界观之间的矛盾。质能等价性使各种力学物理学高度综合，因之成为统一物理学的概念范畴。

爱因斯坦在相对论中抛弃了绝对时空观，量子力学中又否定了因果性和决定论，在物理学的历史上这的确是对传统物理学的一场革命，20 世纪 20 年代的量子力学是对传统物理理论的一次重大突破，尽管术语'革命'有利于说明科学并不是简单地由于科学事实的增多而逐步渐进的发展过程，但这个术语在说明思想观念的非连续性突变，甚至概念出现重大改变时又是模棱两可的。爱因斯坦和普朗克的工作，即相对论和量子论的发展，标志着 20 世纪初期物理学方面的重大变革，人们并没有很好地意识到这是同 19 世纪 90 年代的那场世界观大辩论密切相关的。16 和 17 世纪力学和天文学所取得的智力胜利，使人们对'科学革命'的历史留下了清晰的印象，但是也使人们对'经典'物理留下了坚如盘石的统一世界观的十分错误的印象。这种历史印象使我们可以把'现代'物理的出现当作为对经典物理学的一场'革命'性突破。虽然习惯上强调经典物理和现代物理间的飞跃是对的，尤其从哲学上将 18 和 19 世纪的物理学学说同 20 世纪物理学的相对性、非决定论等学说加以区别时，以及区别 20 世纪 20 年代量子力学出现的前、后物理学的差别时，特别要强调这种突变，但也不能将这种突变强调过头而错误地忽视了经典时期和现代时期在观念上的连续性。

文 献 评 介

引论：19 世纪物理学的概念结构

19 世纪有很多重要的物理教科书都值得当代重印，19 世纪的有些人物传记，尤其可以让人了解当时的信息交流和引人关注的情况，现在看来仍然很有价值。由 C. C. Gillispie 主编的 16 卷本 *The Dictionary of Scientific Biography* (New York, 1970—80) 介绍了 19 世纪物理学家的最重要的文章。很多文章都值得研究，有些文章还列出了大量的参考文献。在 J. T. Merz 所著的 4 卷本 *A History of European thought in the nineteenth century* [(reprint ed., New York, 1965) : 1 : 302—458, 2 : 3—199]，对物理学发展的经典研究工作作了广泛而有价值的总结。E. Meryerson 的 *Identity and reality* (由 K. Loewenberg 译, London, 1930) 是对经典物理所作的研究力作。M. Capek 的 *The philosophical impact of contemporary physics* (Princeton, 1961) 有利于对经典物理的概念基础作出全面的评价。J. B. Stallo 的 *The concepts and the theories of modern physics* (reprint ed., Cambridge, Mass., 1960)，持强烈批判的态度，对 19 世纪物理学作出了近代论述。

在 P. Burke 主编的 *The new Cambridge modern history*: XIII 的 *Companion volume* 中由 P. M. Heimann (Harman) 撰写的“科学革命”一文，对 19 世纪物理学作了详细的讨论。T. S. Kuhn 在 *Journal of Interdisciplinary History* 7 (1976) 上的 1—31 页关于“物理学科发展中的数学和实验传统”一文中，对物理学科的发展作了全面的讨论，本文还收在 Kuhn 的 *The essential tension* [(Chicago, 1977), pp. 31—65] 中。R. McCormmach 在 *Historical Studies in the Physical Science* 3 (1971) 的导言中对物理学的数学和实验的传统主题也作了有益的剖析。C. C. Gillispie 的 *The edge of objectivity* [(Princeton, 1960), pp.

352—520]探索了19世纪物理学的全面状况。

尽管迄今为止,还没有就19世纪物理学的定型组成作过系统的研究,但是J. L. Heilbron在*Electricity in the seventeenth and eighteenth centuries: a study of early modern physics*[(London, 1979),pp.98—166]中,对物理学在早近代时期的组成背景的大致情况作了很有价值的阐述。P. Forman, J. L. Heilbron和S. Weart的专著*Historical Studies in Physical Science* 5(1975)中,为19世纪物理学的构成提供了文献和分类的基础资料。R. Sviedrys发表在*Historical Studies in the Physical Science* 2[(1970),127—45]和*ibid*.7[(1976),405—36]上的题目分别为"维多利亚时代剑桥物理科学的崛起"和"不列颠物理实验的崛起"的两篇文章,描述了英国科学院的物理学。关于德国的物理学,R. S. Turner在*Historical Studies in the Physical Science* 3[(1971),137—82]的"从1818年到1848年普鲁士专业研究的发展:原因和本质",以及C. Jungnickel在*ibid*.10[(1979),3—47]中的"1820年—1850年萨克森的物理科学和数学的教学和研究工作"一文都作过有益的讨论。R. Fox在*Minerva*11[(1973),442—73]中发表的"1800年—1870年间法国的科学企业及研究资助",以及T. Shinn发表在*Historical Studies in the Physical Science* 10[(1979),271—332],上的"法国科学研究的人力系统:数学和物理学科中的机构变化和研究潜力",都对法国物理学科的状况给以特别的关注。J. Cawood发表在*Annals of Science* 34[(1977),551—587]中的"19世纪早期地磁学和国际合作研究的进展"一文中讨论了物理学界的发展壮大的情况。

物理学理论的核心:能量、力和物质

C. A. Turesdell的*Essays in the history of mechanics*(Berlin, 1968),是对理性力学的一本很有参考价值的入门性著作。J. L. Heilbron的*Electricity in the seventeenth and eighteenth centuries*(London, 1979),叙述了19世纪初期电科学发展成为定量物理学的过程,并且分析了早期现代物理理论的构架。由H. J. M. Bos的文章"数学和理性力学",

以及 J. L. Heilbron 的“实验的自然哲学”，分别发表在 *The ferment of knowledge: studies in the historiography of eighteenth - century science*（由 G. S. Rousseau and R. Porter 主编）[（Cambride, 1980）pp. 327—55 和 357—87]中，这两篇文章对 18 世纪的物理学作了很有用的分析。P. M. Heimann[Harman]发表在由 G. N. Cantor 和 M. J. S. Hodge 主编的 *Conceptions of ether: studies in the history of ether theories*, 1740—1900 [（Cambridge, 1981）, pp. 61—83]中的“以太和不可称量流体”一文，全面回顾了不可称量流体理论的发展过程。A. W. Thackray 的 *Atoms and powers: an essay on Newtonian matter-theory and the development of chemistry*（Cambridge, Mass., 1970），该书讨论了 18 世纪化学中的牛顿力学传统。H. E. Guerlac 发表在 *Historical Studeies in the Physics Sciences* 7 [（1976）, 193—276]中的讨论热素说的“作为物理分支的化学：拉普拉斯与拉瓦锡的合作”一文，分析了一种很有影响的功。R. Fox 在 *The caloric theory of gases from Lavoisier to Regnault*（Oxford, 1971）一书中，对热素说作了最系统、最成功的全面阐述。

拉普拉斯以及他的同事们对 19 世纪早期物理学的结构形成发挥了重大的作用。M. P. Crosland 在 *The Society of Arcueil: a View of French Science at the Time of Napoleon* Ⅰ（London, 1967）一书中，研究了 Laplace-Bertholler 学派的工作。R. Fox 发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 4[（1974）, 89—136]上的“拉普拉斯物理学的崛起和衰落”一文，以及 E. Frankel 发表在 *ibid*. 8[（1977）, 33—72]上的“J·B·毕奥和拿破仑法国的实验物理学的数学演进”一文，都讨论过拉普拉斯的定量物理学。E. Frankel 发表在 *Centaurus* 18[（1974）, 223—45]上的论文：“双折射的粒子说研究：马吕斯（Malus）、拉普拉斯以及 1808 年的大奖赛”一文，详细地分析了拉普拉斯的光学。R. Fox 发表在 *British Journal for the History of Science* 4[（1968）, 1—22]上的“杜隆-珀替定律发现的背景”一文，讨论了拉普拉斯热理论的命运变化问题。M. P. Crosland 的 *Gay-Lussac: scientist and bourgeois*

(Cambridge, 1979)一书是拉普拉斯-贝陀莱(Berthollet)集团领导成员的个人小传。M. Crosland 及 C. W. Smith 发表在 *Historical studies in the physical sciences* 9[(1978),1—61]中的题为"1800年—1840年物理学从法国到英国的转移"一文,也涉及到拉普拉斯集团的有关情况。

R. E. Schofield 的 *Mechanism and materialism: British natural philosophy in an age of reason* [(Princeton, 1970), pp. 277—97]一书对19世纪早期英国的物理学科学作了有益的讨论。A. Wood 写的 *Thomas Young, Natural Philosopher* (Cambridge, 1954),即《杨氏传》中,对杨氏的各种创造性活动都作了阐述。杨氏的 *Course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*, 2 vols (London, 1807),将他的光学论文收集在一起,并成为公元1800年左右物理学理论中很有价值的资料。S. C. Brown 写了一本 Rumford 的传记,书名为 *Benjamin Thompson, Count Rumford* (London, 1979)。19世纪初期的英国,对热、光、电都作过很多讨论;R. Olson 发表在 *Annals of Science* 26[(1970),273—304]上的"Rumford 伯爵,John Leslie 爵士和19世纪之初对热性质和热传导的研究";S. J. Goldfarb 发表在 *British Journal for the History of Science* 10[(1977),25—36]上的"热的 *Rumford* 理论:重新评价"一文;G. N. Cantor 发表在 *ibid*. 5[(1970),44—62]上的"杨氏以太学说的作用变更";Cantor 发表在 *Studies in History and Philosophy of Science* 2[(1971),69—89]上的"Henry Brougham 和苏格兰的方法论传统"的文章讨论了对杨氏文章的各种反应;T. H. Levere 在 *Affinity and matter: elements of chemical philophy*, 1800—1865 (Oxford, 1971)一书中对 Davy 和法拉第极为重视。C. W. Smith 发表在 *Annals of Science* 33[(1976),3—29]上的"机械论哲学和英国物理学的出现:1800年—1850年"一文中回顾了英国物理学的发展过程。

E. T. Whittaker 在 *A History of the theories of aether and electricity*: I, *the classical theories* (London, 1951)一书中,对菲涅耳和发光以太作了

经典性研究。K. F. Schaffner 在 *Nineteenth-century aether theories* [(Oxford, 1972), pp. 40—75] 一书中,包括了从菲涅耳、格林、斯托克斯、MacCullagh 到后来的理论工作者们在教科书中用到有关以太的内容都作了概括性描述。由 H. de Senarmot, E. Verder 和 L. Fresnel 主编的 3 卷本 *Oeuvres compléter* (*Paris*, 1866—70) 的头一卷中,收集了菲涅耳关于衍射的论文。R. H. Silliman,在 *Historical Studies in the Physical Science* 4 [(1974), 137—62] 中发表的“菲涅耳和物理学科的出现”一文中,讨论了菲涅耳工作的全面情况。E. Frankel 发表在 *Social Studies of Science* 6[(1976), 141—84] 中的“粒子光学和光的波动论:物理学中的科学和政治革命”一文是对菲涅耳光学作出最细致的很有影响的研究论文。J. Z. Buchwald 发表在 *Archive for History of Exact Science* 21 [(1980), 245—78] 上的“光学和孔状以太”一文,以及在由 G. N. Cantor 和 M. J. S. Hodge 主编的 *Conceptions of ether* [(Cambridge, 1981), pp. 215—37] 一书中的“19 世纪上半叶的定量以太”一文全面评述了菲涅耳、柯希以及其他理论家的分子以太模型。G. N. Cantor 发表在 *Historical Studies in the Physical Science* 6 [(1975), 109—32] 中的“英国对光的波动说的承认”一文中,分析了英国物理学家对菲涅耳的研究情况及其方法论问题。格林、MacCullagh 和斯托克斯的论文都收集在由 N. M. Ferrers 主编的 *Mathematical Papers of the late George Green* (Cambridge, 1871) 一书中;在由 J. H. Jellett 和 S. Haughton 主编的 *The collected works of James MacCullagh* (Dublin, 1880) 和 5 卷本的斯托克斯的 *Mathematical and physical papers*, (Cambridge, 1880—1905) 中也收有这些论文。

1815 年之后,法国的数学物理得到了发展,特别是傅里叶的工作已引起了广泛的关注。A. Freeman 翻译的《热的傅里叶解析理论》(重印版, New York, 1955) 是 19 世纪物理学史上的一本里程碑式的著作。在 *Dictionary of scientific biography* (5: 165—71) 中由 J. R. Ravetz, I. Grattan-Guinness 撰写的标题为“Fourier”的一文中,对傅里叶

的工作作了简洁的说明。由 I. Grattan-Guinness 和 J. R. Ravetz 合作写成的一本书：*Joseph Fourier*, 1768—1830: *a survey of his life and work, based on a critical edition of his monograph on the Propagation of Heat, presented to the Institute de France in* 1807,(Cambridge, Mass. 1970),对傅里叶的数学物理作出了本质性的评述。J. W. Herivel 写的 *Joseph Fourier: the man and physicist* (Oxford, 1975)一书,把传记和傅里叶的物理学研究融为一体。I. Grattan-Guinness 在 *Annals of Science* 32[(1975), 503—14]中,也对本书作了细致的评论。R. M. Friedman 在 *Historical studies in the physical science* 8[(1977),73—99]中发表了一篇题为"新科学的产生:傅里叶的热解析理论"的文章,该文阐述了傅里叶的物理理论和方法论;I. Grattan-Guinness 的发表在 *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications* 5 [(1969), 230—53]中题为"傅里叶和数学物理中的革命"一文,该文讨论了傅里叶的数学方法。J. W. Herivel 发表在 *British Journal of the History of Science* 3 [(1966),109—32]上的文章"19 世纪法国理论物理学的方方面面",着重讨论了法国物理学的方法论问题。

发表在 *British Journal for the History of Science* 5 [(1970),145—67]上由 S. G. Brush 撰写的"热的波动理论:从热素说到热力学演变过程中被遗忘的一段历史"一文对大量文献作了研究,追溯分析热理论的产生同光的波动理论两者间的相似性。出现在由 G. N. Cantor 和 M. J. S. Hodge 主编的 *Conceptions of ether* [(Cambridge, 1981), pp. 187—213]中的由 J. L. Heilbron 撰写的"法拉第之前的电场"一文,详细地分析了 19 世纪早期电学中的以太理论,特别分析了奥斯特和安培的工作。K. L. Caneva 发表在 *British Journal for the History of Science* 13[(1980),121—38]上的"安培,以太论者,以及他们同奥斯特的联系"对以太学说作了进一步的讨论。发表在 *Isis* 48[(1957), 33—50]上的由 R. C. Stauffer 撰写的"奥斯特发现电磁学背后的猜测和实验"一文,讨论了在奥斯特研究工作中自然哲学所起的作用问

题。B. Gower 发表在 *Studies in History and Philosophy of Science* 3 [(1973),301—56]上的题为“物理学中的猜测:自然哲学的历史和实践”一文对 F. W. J. Von Schelling 和 J. W. Ritter 的观念作了有益的说明,并对他们的影响作了批判性的分析。K. L. Caneva 在下述著作中对此也有重要讨论:*Conceptual and generational change in German physics: the case of electricity*, 1800—1846”, [(diss, Princeton Univ., 1974), pp. 99—103, 132—57, 364—413]。这个课题很值得全面系统地研究。

对能量守恒原理的发展过程,有过不少的历史研究。E. N. Hiebert 的专著:*Historical roots of the principle of conservation of energy* (Madison, Wis., 1962)对 18 世纪力学的核心问题作了很有价值的研究,对陈旧的历史文献也作了有益的介绍。W. L. Scott 的 *The conflict between Atomism and conservation theory*, 1644—1860(London, 1970)对刚体碰撞和守恒学说的关系作了全面回顾。T. L. Hankins 发表在 *Isis* 56 [(1965),281—97]中的“18 世纪如何开展口头辩论”一文,以及 P. M. Heimann 发表在 *Centaurus* 21 [(1977),1—26]中的“几何学和自然:莱布尼兹和约翰·伯努利的运动论”一文,都讨论了‘活力’守恒的重要著作。D. S. L. Cardwell 发表在 *British Journal for the History of Science* 3 [(1967),209—24]上的“功率、功和能量概念早期发展的几大要素”一文,讨论了 19 世纪早期功概念的分类问题。

T. S. Kuhn 对 19 世纪 40 年代的能量守恒定律专门写过一篇重要的评论文章,该文原先选在由 M. Clagett 主编的 *Critical problems in the history of science* [(Madison, Wis., 1959), pp. 321—56] 一书中,后来又编入 Kuhn 的 *The essential tension* [(Chicago, 1977), pp. 66—104] 一书中,这篇文章试图对发现能量守恒所需要的科学自觉性及相关的各种因素作出全面的阐述。Y. Elkana 的 *The discovery of the conservatioss of energy* (London, 1974),也对这个问题作了说明;P. Clark 还在 *British Journal for the Philosophy of Science* 27[(1976),165—76]上发表

了对 Elkana 这本书的评论文章。发表在 *studies in the History and Philosophy of Science* 6 [(1975),273—313]上的由 J. Forrester 撰写的“化学和能量守恒:焦耳的工作”一文,对焦耳兴趣改变的有关情况作了交代,还包括焦耳著作的文献索引。E. Mendoza 发表在 *Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* 105 [(1962—3),15—28]上的“气体运动论秘史”,以及 H. J. Steffens 的 *James Prescott Joule and the Concept of energy* (New York, 1979)一书,都对焦耳的工作作了进一步的讨论。焦耳的论文都收集在书名为 *The Scientific Papers of James Prescott Joule* (London, 1884—7)的2卷本中,重印本 London, 1963。

P. M. Heimann 在 *Centaurus* 18 [(1974),147—61]上发表了题为“力守恒和能量守恒”的文章,讨论了‘力守恒’学说以及同能量概念的关系;进一步讨论可参阅 G. N. Cantor 发表在 *Centaurus* 19 [(1976),273—90]上的题为“William Robert Grove,力的关联和能量守恒”;C. W. Smith 发表在 *Isis* 67[(1976),444—9]上的“法拉第作为焦耳的皇家学会论文‘论热的机械等当性’的审读人”一文;还有 D. C. Gooding 发表在 *Annals of Science* 37 [(1980),1—29]上的“形而上学和测量:法拉第的物理学中力的转化和守恒”。Mayer 和 Colding 的工作亦同能量物理的发展密切相关。Mayer 的论文在当代的译著中仍然可以找到:R. B. Lindsay, *Julius Robert Mayer, Prophet of energy* (Oxford, 1973)。P. M. Heimann 发表在 *Historical Studies in the Physical Science* 7 [(1976),277—96] 上的“Mayer 的力概念:新物理科学的主心骨”一文,分析了 Mayer 的物理学。在 P. F. Dahl 的 *Ludvig Colding and the Conservation of energy* (New York, 1972)一书中载有 Colding 的论文译文以及导读文章。

由 J. Tyndall 和 W. Francis 主编的 *Scientific memoris, natural philosophy* [(London, 1953;重印本:New York, 1966) pp. 114—62]一书登载了亥姆霍兹的“论力守恒”一文的译文。R. Kahl 在 *Selected Writings of*

Hermann von Helmholtz [(Middletown, Conn., 1971), pp.3—55]中又出版了修正后的译文。原来的纪念集 *Ueber die Erhaltung der Kraft* (Berlin, 1847)也已重印(Brussels, 1966)。亥姆霍兹论能量物理的大多数著述都收进3卷本的 *Wissenschaftliche Abbandlungen* (Leipzing, 1882—95)一书中了。R.S.Turner 在 *Dictionary of Scientific biography* (6:241—53)中所写的"亥姆霍兹"词条,对亥姆霍兹的学术工作作出了简洁的说明。L.Keenigsberger 著的传记 *Hermann von Helmholtz* 已由 F.A.Welby 译成英文并作了删改(Oxford, 1906)。P.M.Heimann 发表在 *Studies in History and Philosophy of Science* 5 [(1974), 205—38]上的"亥姆霍兹和康德:Ueber die Erbaltung der Kraft 的形而上学基础"一文,分析了亥姆霍兹能量物理的基本概念。Y.Elkana 发表在 *Physical Science* 2 [(1970), 263—98]上的文章"亥姆霍兹的艺术:通量概念的解释"指出,亥姆霍兹的观念是模糊的。由 R.S.Cohen 和 Y.Elkana 编辑的亥姆霍兹专辑,由 M.F.Lowe 翻译的《综合图书馆》第79卷(Dordrecht, 1977)还收进了主要文献目录。F.L.Holmes 为 *Animal Chemi-stry* (重印版, New York, 1964)一书(作者为 Justus Liebig)所写的序中涉及了亥姆霍兹对生理学本质所作的详细研究工作。T.O.Lipman 发表在 *Isis* 58[(1967), 167—85]上的文章"Liebig 生理学思想中的活力论与还原论",该文讨论了 Liebig 的活力论与他的'力'转换概念之间的关系。P.F.Cranefield 发表在 *Journal of the History of Medicine* 12 [(1957), 407—23]中的"1847年的有机物理学和今天的生物物理学";以及 C.A.Culotta 发表在 *Historical Studies in the Physical Science* 4 [(1974), 3—48]中的"德国生物物理学,客观知识和浪漫主义";这些文章对亥姆霍兹的生理学理论作了集中的分析。R.S.Turner 发表在 *British Journal for the History of Science* 10 [(1977), 1—24]上的"欧姆-Seeback 之间的争论,亥姆霍兹和生理声学的出现"一文也有相关内容的论述。

能量物理学和力学解释

能量概念的发展是同热过程的研究交替发展的。由 D. S. L. Cardwell 编的 *From Watt to Clausius: the rise of thermodynamics in the early industrial age* (London, 1971),对热力学的早期历史作了介绍,重点放在技术发展的推动作用上。R. Fox 在 *Reflexions sur la puissance motrice du feu* (Paris, 1978)一书中,对 S·卡诺作了专门的叙述,其中有导读文章和文献专论。卡诺的回忆录译文,克拉珀龙对卡诺理论的研究论文以及克劳修斯关于热力学的第一篇论文,一并收集在由 E. Mendoza 主编的 *Reflections on the motive power of fire by Sadi Carnot and other papers on the second law of thermodynamics by E. Clapeyron and R. Clausius* (New York, 1960)中。对卡诺作过有益研究的有:E. Mendoza 发表在 *Archives Internationals d'Histoire des Science* 12 [(1959),377—96]上的题为"S·卡诺和他的研究工作对科学的贡献";T. S. Kuhn 发表在 *Isis* 49[(1958),132—40]上的"绝热压缩过程中的卡诺理论"以及发表在 *Ibid*. 52[(1961),567—74]上的"S·卡诺和 Cagnard 引擎";D. S. L. Cardwell 发表在 *Technology and Culture* 4 [(1965),188—207]上的"动力学技术和科学的进展";R. Fox 发表在 *Notes and Records of the Royal Society* 24 [(1969),233--53]上的"卡诺作功过程中的瓦特膨胀原理和 Nicolas Clément";P. Lervig 发表在 *Archive for History of Exact Science* 9[(1972),222—39]上的"卡诺热理论的结构";以及 M. J. Klein 发表在 *Physics Today* 27[(1974),23—28]上的"卡诺对热力学的贡献"。在 *Lazare Carnot, Savant* (Princeton, 1971)一书中 C. C. Gillspie 对 Lazare 和 S·卡诺之间的关系作了讨论.文集 *Sadi Carnot et léssor de la thermodymique* (Paris, 1976)一书收有 Gillispie, Klein, Mendoza, Fox 和 Lervig 的文章,该文集中 M. J. Klein 的文章(pp. 213—19)"闭合卡诺循环"阐明了克拉珀龙对卡诺循环的研究。

由 S. P. Thompson 撰写的 *The life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs* (London, 1910)2 卷本,是一本典型的关于 W·汤姆孙的传记,

本书还含有对文献资料的很有价值的研究。J. Larmor 发表在 *Proceedings of the Royal Society*, *Ser*. A81(1908), ii - lxxvi 中题为"William Thomson, Baron Kelvin of Largs, 1824 年—1907 年"一文起到了讣告注释的作用,这是对汤姆孙工作,从当时角度作出全面评估的很有参考价值的工作。汤姆孙论热力学的主要著作都收集在他的 6 卷本的 *Mathematical and physical papers* (Cambridge, 1822—1911)中的第一卷中。C. W. Smith 在 *British Journal for the History of Science* 9[(1976), 293—319]中发表的"自然哲学和热力学:威廉·汤姆孙与热的动力学理论",分析了汤姆孙的热力学的智识框架。Smith 详细说明了 J·汤姆孙,W·汤姆孙,焦耳和伦福德之间的相互影响,这从他发表在 *Archive for History of Exact Sciences* 16 [(1976),231—88]中的"W·汤姆孙和热力学的产生"一文中可以看到。K. Hutchison 发表在 *Centaurus* 20[(1976),279—304]上的"迈耶的假设:热力学的早期研究"一文对此又作了进一步的讨论。M. N. Wise 在 *Historical Studies in the Physical Science* 10[(1979),49—83]上发表了"W·汤姆孙对能量守恒的数学处理办法:关于数学在概念形成过程中的作用的一个实例研究"一文,对汤姆孙热力学提出了一个重要的观点。

R. Clausius 在 19 世纪已把克劳修斯论热力学的主要文章都译成了英语,收在 T. A. Hirst 主编的 *The Mechanical theory of heat* (London, 1867)一书中。J·W·Gibbs 写的讣告发表在 *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 16[(1889),458—65]上,题目为"鲁道夫.J.E.克劳修斯",本文是一篇资料翔实的当代评论。由 M. J. Klein 撰写的发表在 *Historical Studies in the Physical Science* 1 [(1969),127—49]上的"吉布斯论克劳修斯"一文,对热力学历史作了透彻的分析。S. G. Brush 在 *Archive for History of Exact Sciences* 12 [(1974),1—88]上发表的"随机性和不可逆性"一文,对熵的概念作了极为重要的论述。由 W. J. Millar 主编的题目为 *Miscellaneous Scientific Papers of W. J. Macquorn Rankine* (London, 1881) 一卷中,收集了

Rankine 关于能量物理的大多数论文。K Hutchison 发表在 *British Journal for the History of Science* 14[(1981),1—26]上的"W.J.M.Rankine 和热力学"一文对 Rankine 的工作作了全面剖析。发表在 *Isis* 58[(1967),293—303]上的由 E.F.Daub 撰写的"原子论和热力学"一文,将 Rankine 和克劳修斯的分子假设作了对比;Daub 还在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 2[(1970),321—54]上发表了"熵与耗散"一文,讨论了泰特和克劳修斯的争论。J.T.Lloyd 出版了泰特-克劳修斯争论的有关资料,见 *Ntoes and Records of the Royal Society* 25[(1970),211—25]中的"焦耳-迈耶争论的背景"一文。关于'力'的转化和迈耶的'力'理论见上一节中罗列的相关文献。

19 世纪 50 年代和 60 年代能量物理的出现是一项重大的进展。D.F.Mayer 在 *Studies in History and Philosophy of Science* 8[(1977),251—68]中发表的"能量、动力学、隐含的机械功:Rankine,汤姆孙和泰特,麦克斯韦"一文,讨论了汤姆孙和泰特的动力学;C.W.Smith 发表在 *History of Science* 16[(1978),231—79]上的"英国自然哲学的新动向:19 世纪能量物理学的发展"一文,集中讨论了汤姆孙的能量物理学的智识框架。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦的教科书:*Matter and Motions*(London,1877;New York 重印)是一本介绍 19 世纪动力学理论的很好的书籍。汤姆孙的修订版(1912 年)和泰特的 *Treatise on Natural Philosophy*(Oxford,1867)也有重印本(New York,1962)。

关于热力学和宇宙学,J.D.Burchfield 在 *Lord Kelvin and the age of earch*(New York,1975)一书中,讨论了汤姆孙对地学研究的影响;而 S.G.Brush 在 *The temperature of history: phases of science and culture in the nineteenth century*(New York,1978)一书中,对热力学所派生的分支学科作了广泛的研究。关于神学问题,E.N.Hiebert 在 *Daedalus* 95[(1966),1046—80]上发表了"宗教对热力学的使用和歧视"一文,该文研究稍后的某些发展;P.M.Heimann 在 *British Journal for the His-*

tory of Science 6 [(1972),73—9]上发表的"看不见的宇宙:维多利亚时代英国的物理学和自然哲学"一文,讨论了 Stewart 和泰特的争论。D.B. Wilson 在 *Nature and the victorian imagination* [(编辑为:U. C. Knoepflmacher 和 G. B. Tennyon, Berkeley, 1978), pp. 201—15]中所写的"物理学中自然的概念:从 John Herschel 到 Karl Pearson"一文,评述了维多利亚时代物理学家们的神学论点。这一课题要求系统地研究 19 世纪的自然主义同其他传统之间的关系。

物质和力:以太和场论

关于场论的提出和发展的问题,曾有过很多带有普遍性的研究工作,许多研究还有不同的视角。B.G. Doran 发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 6 [(1975), 133—260]上的"19 世纪英国场论的起因和巩固:从力学自然观到电磁学自然观"一文,是一篇范围很广的分析文章,重点放在威廉·汤姆孙和 Larmor 身上,并最大限度地肯定 19 世纪的场论和以太论的力学基础。L. Rosenfeld 在 *Nuovo Cimento*, *Supp*. 4[(1956), pp. 1630—69]上发表的"光速和电动力学的演化"一文,既突出了洛伦兹的作用,又注重麦克斯韦和赫兹的那些很有价值的文章。与此形成对照的是,L. P. Williams 的 *The origins of field theory* (New York, 1966)一书,突出了法拉第的功绩,并提出在形成场论概念之初,Boscovich 和自然哲学产生过重大影响。W. Berkson 的 *Field of force: the development of a world view from Faraday to Einstein* (London, 1974)一书,对若干重要人物的观点都作了介绍,再次突出了法拉第的作用。J. E. McGuire 在 *Boston studies in the philosophy of science* XIV [(Dordrecht, 1974), pp. 119—59]中发表的"力、功率、以太和场"一文,指出场概念完全植根于对物质论的讨论。M. B. Hesse 在 *Forces and Fields: the concept of action at a distance in history of physics* [(London, 1961), pp. 189—225]一书中,讨论了场论模型的

作用。M. Jammer 的 *Concepts of force: a study in the foundations of dynamics* (Cambridge, Mass., 1957) 一书中，分析了在物理学史中力概念的地位。E.T. Whittaker 的 *A history of theories of aether and electricity: I. the classical theories* (London, 1951) 一书，是场论和以太概念的经典研究工作的总结。K. Schaffner 的 *Nineteenth-century aether theories* [(Oxford, 1972), pp.76—117]，对场和以太理论作了有益综合，书中有关于 Fitzgerald, Larmor 和洛伦兹所选用的教科书的介绍。G.N. Cantor 和 M.J.S. Hodge 主编的 *Conceptions of a ether* [(Cambridge, 1981), pp.1—60]，该书对以太和场论都作了评述。

法拉第论电磁学的主要论文都收集在他的 3 卷本的 *Experimental researchs in electricity* (London, 1839—55；重印版：New York, 1965) 一书中。由 T. Martin 主编的 7 卷本 *Faraday's diary, being the various philosophical notes of experimental investigation made by Michael Faraday* (London, 1932—6)还有更多的材料。H. Bence Jones 的 2 卷本 *The life and letters of Faraday* (London, 1870)包含私人信件和其他文件。由 L.P. Williams 主编的 2 卷本 *The selected correspondence of Michael Faraday* (Cambridge, 1971)收有以前未发表的大量材料，这都是涉及到 19 世纪的史料问题，因此也是必要的资料。

A.E. Jeffreys 将法拉第的文献分类编目，成为很有价值的参考资料：*Michael Faraday: a list of his lectures and published writings* (London, 1961)。J. Agassi 在 *Faraday as a natural philosopher* (Chicago, 1971) 一书中对法拉第作了全面的介绍，而 L.P. Williams 的 *Michael Faraday: a biography* (London, 1965)又有更详细的研究，对法拉第的研究工作作了系统的整理和归纳。Williams 强调 Boscovich 对法拉第的自然观曾经产生过重要的影响，J.B. Spencer 对此提出过异议，他在 *Archive for History of Exact Sciences* 4[(1967), 184—202]上发表了"Boscovich 理论及与法拉第研究的关系：一种分析方法"一文，P.M. Heimann 在 *British Journal for the History of Science* 5[(1971), 235—57]上发表了

“法拉第的物质论和电理论”，讨论了在法拉第场论的发展初期，18世纪英国自然哲学对物质论所产生的影响问题。P. M. Heimann 和 J. E. McGuire 在 *Historical Studies in Physical Sciences* 3 [(1971), 233—306]上发表了题为“牛顿力和 Lockean 功：18 世纪学术思想中的物质观”一文，对哲学传统作了细致的分析。T. H. Levere 在 *British Journal for the History of Science* 4[(1968), 95—107]中发表了一篇很有意义的文章：“法拉第，物质和自然神学：未出版手稿的影响”。D. C. Gooding 在 *Studies in History and Philosophy of Science* 9 [(1978), 117—49]中发表了“法拉第否定静电超距作用的概念基础和实验依据”一文，将法拉第对物质论的讨论作了进一步的分类；Gooding 在 *British Journal for the History of Science* 13[(1980), 91—120]中的“法拉第、汤姆孙和磁场的概念”，以及他在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 11[(1981), 231—75]中的“走进场论的最后一步：法拉第对磁现象的研究，1845 年—1850 年”一文，全面论述了法拉第的场论。J. B. Spencer 在 *Isis* 61 [(1970), 34—51]上发表的“论 19 世纪发现磁-光现象的方方面面”一文，评述了法拉第对磁-光转动的发现经过。

威廉·汤姆孙关于电磁学的早期研究工作都收集在他的 *Reprint of papers on electrostatics and magnetism* (London, 1872)一书中。J. Z. Buchward 发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 8 [(1977), 101—36]上的“威廉·汤姆孙和法拉第静电学的数学论述”一文，考证了汤姆孙的早期工作。R. H. Silliman 发表在 *Isis* 54[(1963), 461—74]上的“威廉·汤姆孙：烟圈及其 19 世纪的原子论”一文，讨论了涡旋原子论。O. Knudsen 在 *Centaurus* 16[(1972), 41—53]上的“从开尔文勋爵的笔记本，看对以太的猜测”一文，对重要的手稿都作了有益的评说。C. W. Smith 在 *Annals of Science* 37[(1980), 387—412]上发表的“宇宙工程：威廉·汤姆孙和 Fleeming Jenkin 论物质的性质”一文，对汤姆孙的物理理论作了全面的剖析。

麦克斯韦关于电磁学的主要论文都收集在由 W. D. Niven 主编的 2 卷本文集 *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge, 1890, 重印: New York, 1965)中; 并且还收录在 2 卷本的麦克斯韦的 *Treatise on electricity and magnetism* (Oxford, 1873; 第 3 版重印: New York, 1954)中。在麦克斯韦传中以及在他的主要同代人的传中可以看到他的大部分书信, 同代人有 L. Campbell 和 W. Garnett, 传记名为 *The life of James Clerk Maxwell* (London, 1882), 1884 年的第二版(New York, 1969)还包含有在第一版重印中的那些补充的信件。C. G. Knott, *life and scientific work of Peter Guthrie Tait* (Cambridge, 1911), 以及由 J. Larmor 主编的 2 卷本 *Memoir and scientific correspondence of the late Sir George Gabriel Stokes, Bart*, (Cambridge, 1907)。Larmor 把麦克斯韦给汤姆孙的有关电学的重要信件都收在他的发表在 *Proceedings of Cambridge Philosophical Society* 32 [(1936), 695—750]的文章——"从给威廉·汤姆孙的熟知信件中, 看到克拉克·麦克斯韦的电学思想的起因", 该文还被分卷引用重印(Cambridge, 1937)。麦克斯韦在 Aberdeen 的通俗性讲演已由 R. V. Jones 以题为"詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在Aber-deen, 1856 年—1860 年"一文发表, 见 *Notes and Records of the Royal Society* 28[(1973), 57—81]。

C. W. F. Everitt, 在给 *Dictionary of scientific biography* [9: 198—230]上的"麦克斯韦"这个词条基础上, 写了一本题为 *James Clerk Maxwell: physicist and natural philosopher* (New York, 1975)一书, 对麦克斯韦的科学工作作了全面综述。M. N. Wise 在 *Archive for History of Exact Science* 24(1981)上发表的两篇文章: "电学和磁学的流体模拟: 第一部分, 威廉·汤姆孙对超距作用的改进", "第二部分: 麦克斯韦场论中的第一方程", 这两篇文章对汤姆孙和麦克斯韦早期的场论工作作了详尽的分析。D. M. Siegel 写的"汤姆孙、麦克斯韦和维多利亚时代物理学中的宇宙以太"一文, 见由 G. N. Cantor 和 M. J. S. Hodge 主编的 *Conceptions of ether* [(Cambridge, 1981), pp. 239—

68]一书，本文全面回顾了麦克斯韦场论的发展过程，对位移电流的概念作了很高的评价。发表在 *Archive for History of Exact Science* 6 [(1970)，171—213]上的 P. M. Heimann 的文章："麦克斯韦和自洽描述的方式"，该文阐述了麦克斯韦如何发展法拉第的观念，并对麦克斯韦的世界观进行了分析。T. K. Simpson 发表在 *Studies in History and Philosophy of Science* 1 [(1970)，249—63]上的"关于麦克斯韦电磁学的几种实验观测"，以及 D. F. Moyer 发表在 *ibid*. 9 [(1978)，35—50]上的"场论和连续力学：汤姆孙和麦克斯韦"一文，这两篇文章介绍了麦克斯韦动力学解释的概念。M. N. Wise 发表在 *Science* 203[(1979)，1310—18]上的"电学磁学互相交缠"一文，分析了麦克斯韦电磁学理论的概念结构。

麦克斯韦的电荷概念和位移电流的概念都从经典物理角度作过很多的讨论，而且角度多种多样，见 P. Duhem 的 *les théories electrigues de J. Clerk Maxwell: etude historique et critique* (Paris，1902)。J. Bromberg 对这个问题当时的进展作了详细的分析，见 *Archive for History of Exact Science* 4[(1967)，218—34]上的"麦克斯韦的位移电流和他的光学理论"一文；以及发表在 *American Journal of Physics* 36 [(1968)，142—51]上的"麦克斯韦静电学"一文。对于麦克斯韦论述的高明之处，至今仍然说法不一。O. Knudsen 发表在 *Archive for History of Exact Sciences* 15[(1976)，235—81]上的"法拉第效应和物理理论，1845 年—1873 年"一文，对麦克斯韦及其他物理学家对磁光效应的有关描述作了详尽的分析。M. J. Crowe 的 *A History of Vector analysis* (London，1967)一书，讨论了麦克斯韦论文中采用矢量分析的意义，并且就矢量分析和 19 世纪电磁理论发展的关系作了讨论。

对麦克斯韦的叙述办法已经有很多评论。P. Duhem 作了经典的极其不同的分析：见 *The aim and structure of physical theory*，已由 P. P. Wiener 译出[(Princeton，1954)，pp. 55—104]。更近的讨论有：发表在 *British Journal for the Philosophy of Science* 6[(1955)，226—38]上

的 J. Turner 的文章"麦克斯韦的物理类比法",以及发表在 *Philosophy of Science* 23[(1956),36—47]上的"麦克斯韦关于动力学解析的逻辑";发表在 *Journal of the History of Ideas* 30 [(1969),423—36]上由 R. Kargon 写的"维多利亚时代科学的模型和模拟:麦克斯韦和法国物理学家";在 R. N. Giere 和 R. S. Westfall 主编的 *Foundations of scientific method: the Nineteenth century* [(London, 1973), pp. 86—114]一书上的由 M. B. Hesse 撰写的"麦克斯韦电磁理论的发展逻辑";A. F. Chalmers 发表在 *Studies in History and Philosophy of science* 4[(1973), 107—64]上的"麦克斯韦的方法论和他的方法在电磁学中的应用";以及 D. M. Siegel 发表在 *Isis* 66 [(1975),361—8]上的"麦克斯韦电磁理论的总体目标";G. E. Davie 的 *The democratic intellect: Scotland and her universities in the nineteenth century* [2d, ed. (Edinburgh, 1964), pp. 192—7]一书,该书提到了苏格兰共同体的哲学对麦克斯韦的对比研究观念的影响,R. Olson 对此作了简洁的说明,见 *Scottish philosophy and British physics*, 1750—1880: *a study in the foundations of the Victorian scientific style* [(Princeton, 1975), pp. 287—321],这里讨论了苏格兰哲学对不列颠物理学家所作的假设产生了深刻的影响。

麦克斯韦的不列颠追随者对电动力学的发展并没有太多的贡献。J. Z. Buchwald 发表在 *Centaurus* 23 [(1979—80),51—99,118—62]上的"霍尔效应和麦克斯韦 19 世纪 80 年代的电动力学"一文,重新评价了麦克斯韦的电荷理论以及不列颠物理学家对电荷理论的解释。在由 G. N. Cantor 和 M. J. S. Hodge 主编的 *Conceptions of ether* [(Cambridge, 1981), pp. 309—40]一书上,H. Stein 的"后麦克斯韦时期物质的美妙形态"一文讨论了以太理论。D. R. Topper 在 *Archive for History of Exact Science* 7[(1971),393—410]中发表的"服从的机制:J·J·汤姆孙,早年"一文,讨论了汤姆孙的力学自然观。Joseph Larmor 的著作 *Aether and matter: a development of the dynamical relations of*

the aether to matter on the basis of the atomic constitution of matter（Cambridge, 1900），对世纪之交时的以太理论作了适时的分析和展望。Larmor 论以太的文章也被收进他的 2 卷本 *Mathematical and physical papers*（Cambridge, 1929）一书中。Larmor 还将 Fitzgerald 的论文收进他的 *The scientific writings of the late George Francis Fitzgerald*（Dublin, 1902）一书中。J. H. Poynting 的 *Collected Scientific Papers*（Cambridge, 1920）和 Oliver Heaviside 的 *Electromagnetic Theory*（3 卷本，Cambridge, 1893—1912），这两本书都是重要的参考资料。

关于德国的电动力学，K. L. Caneva 发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 [(1978), 63—159] 上的"从伽伐尼到电动力学：德国物理学的进步及其社会原因"，这篇文章全面总结了 19 世纪后半叶物理学的发展状况。K. H. Wiederkehr 的 *Wilhelm Eduard Weber*（Stuttgart, 1967）一书，是一本研究文献的专著。Weber 的理论可从他在 1848 年的文章中找到，也可以从 R. Taylor 主编的 5 卷本 *Scientific memoirs* [(London, 1852，这是译本，重印：New York, 1966), pp. 489—529] 找到。他的电学论文收在他的 6 卷本 *Werke*（Berlin, 1892—4）中的第 3 卷中。A. E. Woodruff 发表在 *Isis* 53 [(1962), 439—59] 中的"19 世纪电动力学中的超距作用"一文，讨论了 Weber 的工作。在 G. N. Cantor 和 M. J. S. Hodge 主编的 *Conceptions of ether* [(Cambridge, 1981), pp. 269—307] 一书中，由 M. N. Wise 写的"德国的力、能和电磁以太的观念：1845 年—1880 年"一文，对从 Weber 到亥姆霍兹的德国电动力学作了很好的分析。R. McCormmach 为 *Dictionary of scientific biography*, 6: 340—50 上所写的"赫兹"一文，对赫兹的工作作了很好的概括。T. K. Simpson 发表在 *Isis* 57 [(1966), 411—32] 上的"麦克斯韦和他的电磁理论的直接实验检测"一文，论述了赫兹实验的实质性意义。S. D'Agostino 在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 6 [(1975), 261—323] 上的"赫兹对电磁波的研究"一文，详细说明了赫兹的实验以及这些实验的理论意义。P. M.

Heimann 发表在 *Isis* 62 [(1971),149—57]上的"麦克斯韦、赫兹和电学的性质"一文,讨论了赫兹对麦克斯韦理论的解释。由 D.E. Jones 译出的 H·赫兹的书:*Electric waves: being researches on the propagation of electric action with finite velociy through space* [(London, 1893,重印版;New York, 1962)]是赫兹关于电学的重要文集。

T. Hirosige 在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 7 [(1976),3—82]上发表的"以太问题,力学世界观和相对论的根源"一文,很好地说明了这段时间里的混乱局面和以太。D. B. Wilson 在 *British Journal for the History of Science* 6 [(1972),57—72]上发表的"G·G·斯托克斯论星际不稳定性和发光以太"一文,以及 L. S. Swenson 在 *The ethereal ether: a history of the Michelson-Morley-Miller aether-drift experiments, 1880—1930*(London, 1972)一书,又对以太问题作了进一步的讨论。

洛伦兹关于电动力学的主要论文都收录在他的 9 卷本文集 *Collected papers*(The Hague, 1834—9)中的第二、第六卷中。T. Hirosige 在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 1[(1969),151—209]中发表的"洛伦兹的电子论起因和电磁场的观念"一文,对洛伦兹电动力学的发展过程作了深入的分析。Hirosige 在 *Japanese Studies in the History of Science* 5 [(1966),1—49]上发表的"相对论之前的电动力学,1890 年—1905 年"一文。对洛伦兹及其同代人的研究工作作了综合性的论述。R. McCormmach 在 *Isis* 61 [(1970),459—97]上发表的"H·A·洛伦兹和电磁学世界观"一文,阐释了洛伦兹理论和它的物理含义及其概念框架。McCormmach 在 *Dictionary of scientific biography*, 8:487—500 上写的"洛伦兹"词条,很好地表述了洛伦兹的工作。

D. B. Wilson 在 *Victorian Studies* 15[(1971),29—48]上发表的"后维多利亚时代的物理学家:Oliver Lodge 的以太实体"一文,对以太理论作了更加全面的阐述,而 B. Wynne 在 *Natural Order: historical studies of scientific culture* [主编:B. Barnes 和 S. Shapin, (London, 1979), pp.

167—86]一书中,写了一篇“物理学和超自然:科学、符号的作用和后维多利亚时代不列颠的社会控制”的文章,本文全面涉及以太论。

物质论:分子物理学问题

A. W. Thackray 把道尔顿的论文都集中发表在 *John Dalton: Critical assessment of his life and science* (Cambridg, Mass., 1972)一书中。H. Guerlac 在由 D. S. L. Cardwell 主编的 *John Dalton and the progress of science* [(Manchester, 1968), pp. 57—91]一书中,写了一篇题为“道尔顿原子论的背景”的文章,该文也对道尔顿的其他方面的情况作了交代。A. J. Rocke 在 *Historical Studies in the Physical Science* 9[(1978), 225—63]中的“原子和代用物:化学原子论的初期发展”一文,分析了化学原子论的发展过程和地位,评述了这一学科里的文献情况。W. H. Brock 和 D. M. Knight 在 *Isis* 56 [(1965), 5—25]上发表的“原子的争论”,以及由 W. H. Brock 主编的 *The atomic debates* (Leicester, 1967)一书,都对 19 世纪 60 年代化学原子论中的争论作了讨论。G. Buchdahl 在 *British Journal for the Philosophy of Science* 10[(1959), 120—34]中发表的“对原子论敏感的原因”一文,以及 M. J. Nye 在 *Studies in History and Philosophy of Science* 7[(1976), 245—68]上发表的“19 世纪关于原子的争论”;这两篇文章都讨论了 19 世纪对原子论的敏感情况。由 D. M. Knight 主编的 *Classical Scientific papers: chemistry* (London, 1968, 1970),有两卷是关于原子论和化学元素的原始论文的摹写本。关于有机化学的结构研究,可以参阅:J. H. Brooke 发表在 *British Journal for the History of Science* 5[(1971), 363—92]上的“有机合成和化学的统一性:一种新的评价”一文,以及发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 6[(1975), 405—29]上的“Laurent, Gerhardt 和化学哲学”;还有 S. C. Kapoor 在 *Isis* 60 [(1969), 477—

527]上发表的"Laurent 关于有机物分类的起源"。

克劳修斯、麦克斯韦和玻耳兹曼关于气体运动论的论文都收录在 S.G.Brush 主编的 2 卷本 *Kinetic theory* (Oxford, 1965—6)一书中了。Brush 的 2 卷本 *The kind of motion we call heat: a history of the kinetic theory of gases in the nineteenth century* (Amsterdam, 1976)一书,是一本关于气体理论和热力学的专论,把本课题作者的重要论文都收集起来了,还包括一个 19 世纪所发表的关于气体运动论的著作目录。18 世纪和 19 世纪早期都有很多很好的气体运动论的研究工作,见 G.R.Talbot 和 A.J.Pacey 发表在 *British Journal for the History of Science* 3 [(1966),133—49]上的"早期的气体运动论:Herapath and his predecesors"一文;E.Mendoza 发表在 *ibid*. 8[(1975),155—65]上的"Herapath 对气体动力学理论的重要验证";以及 C.T.Truesdell 发表在 *Archive for History of Exact Sciences* 15[(1975),1—66]上的"早期气体运动论"等。

I.Schneider 发表了两篇文章"Clausius' erste Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung"和"Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden",专门讨论了克劳修斯把概率论的方法引入到气体理论中,这篇文章发表在 *Archive for History of Exact Sciences* 14 [(1974—5),143—58]及(237—61)上。C.C.Gillispie 在由 A.G.Crombie 主编的 *Scientific Change* [(London, 1963), pp.431—53]一书中写了"概率分析背景的创造性因素"一文;E.Garber 在 *Centaurus* 17 [(1972),11—39]上发表的"概率论介绍到物理中的方方面面"一文;这两篇文章都讨论了麦克斯韦引进概率的大致情况。E.Garber 在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 2 [(1970),299—319]的"克劳修斯和麦克斯韦的气体运动论"一文,分析了克劳修斯对麦克斯韦的影响。H.T.Bernstein 在 *Isis* 54 [(1963),206—16]中的"J.克拉克·麦克斯韦论气体运动论的历史"一文,阐明了麦克斯韦手稿的学术价值。P.M.Heimann 在 *Studies in History and Philosophy of*

Science 1 [(1970),189—211]中的"分子力,统计解释和麦克斯韦妖",该文讨论了麦克斯韦如何引进概率并分析了统计物理学中的概率概念的大致结构。

关于分子物理学、光谱学和能量均分原理等问题的讨论,见 E. Garber 发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 [(1978),265—97]上的"19 世纪后期不列颠的分子科学",M.J.Klein 发表在 *physica* 73 [(1974),28—47]上的"范德瓦尔斯方程的历史根源",本文分析了维里定理对建立分子模型所产生的影响。R.J.Strutt 的 *Life of John William Strutt, Third Baron Rayleigh*(修订版,Madison, Wis., 1968)一书,有 Rayleigh 的传记,还有信件。W.McGucken 的 *Nineteenth Century Spectroscopy: development of the understanding of spectra* 1802—1897 (London, 1969)一书,对光谱学问题作了全面的归纳。D.M.Siegel 在 *Isis* 67 [(1976),565—600]上发表的"基尔霍夫的辐射定律"一文,还有 H.Kangro 的 *Early history of Planck's radiation law* (London, 1976),都讨论了光谱学和辐射理论问题。关于光谱学和化学元素还有几篇有用的文章:W.V.Farrar 发表在 *British Journal for the History of Science* 2 [(1965),297—323]上的"19 世纪对化学元素复杂性的猜测";W.H.Brock 在 *Ambix* 16[(1969),81—99]上发表的"Lockyer 和化学家:第一个分解假设";以及 R.K.Dekosky 在 *British Journal for the History of Science* 6 [(1973),400—23]上发表的"光谱学和 19 世纪后期的元素:威廉·克鲁克斯爵士的工作"

麦克斯韦的 *Theory of heat* (London, 1871)的第三版已被重印(Westport, Conn., 1970)。E.E.Daub 的题为"麦克斯韦妖"的文章对此也有专论,见 *Studies in History and Philosophy of Science* 1 [(1970), 213—27]。M.J.Klein 在 *American Scientist* 58 [(1970),84—97]上发表的"麦克斯韦,他的妖及热力学第二定律"一文,以相当透彻的笔触,分析了麦克斯韦和玻耳兹曼的统计物理学。Klein 在他的发表在 *Acta Physica Austriaca, Supplement* 10 [(1973),53—106]上的论文

“玻耳兹曼统计思想的发展”中,将玻耳兹曼对热力学第二定律的统计解释结果进行了更加详细的分析。Klein 的 *Paul Ehrenfest: the making of a theoretical physicist* (Amsterdam, 1970) 一书,包括了对玻耳兹曼等人在内的19世纪的研究课题都作了很有价值的探讨。S.G. Brush 写了两篇重要文章,讨论统计物理的有关问题:发表在 *Archive for History of Exact Science* 4 [(1967),145—83]上的“统计力学基础:1845年—1915年”,以及在 *Ibid*. 12 [(1974),1—88]上的“气体运动论的发展:Ⅷ. 随机性和不可逆”;这两篇文章都在 Brush 的重版的 *The kind of motion we call heat* [(Amsterdam, 1976),2:335—85及543—654]上。S. G. Brush 还在 *Journal of the History of Ideas* 37 [(1976),603—30]中发表了以题为“不可逆性和不确定性:从傅立叶到海森伯”的文章,对统计力学基础作了进一步的讨论。而且 Brush 还研究了分子物理学同热力学的相互联系问题。P. Clark 在 C. Howson 主编的 *Method and appraisal in the physical science* [(Cambridge, 1976), pp. 41—105]上撰文“原子论与热力学”,此文强调了概念上的一次飞跃。P. Ehrenfest 和 T. Ehrenfest 还对玻耳兹曼的统计思想作了经典性的讨论,见 M. J. Moravcsik 的译著:*The conceptual foundations of the statistical approach in mechanics* (Ithaca, N.Y., 1959)。玻耳兹曼的论证可参照他的 *Lectures on gas theory*, (S. G. Brush 译, Berkeley, 1964)。玻耳兹曼的论文收集在由 F. Hasenöhrl 主编的3卷本文集 *Wissenschaftliche Abbandlungen* (Leipzig, 1909)中。R. Dugas 在 *La théorie physique au sensde Boltzmann* (Neuchâtel, 1959)上也作了一般的讨论。

M. J. Klein 对吉布斯的工作作了很好的说明,见发表在由 E.G. Forbes 主编的 *Human implications of scientific advance* [(Edinburgh, 1978), pp. 330—41]上的“J·W·吉布斯的早期论文:热力学的过渡”,还有 *Dictionary of scientific biography* 5:386—93 上的“吉布斯”条目;进一步讨论可见 E. Garber 发表在 *American Journal of physics* 37 (1969), 146—55]上的“詹姆斯·克拉克·麦克斯韦和热力学”一文。L. P.

Wheeler 写了一本传记：*Josiah Willard Gibbs*（New Haven，1952）。F. I. Holmes 在 *Chymia* 8[(1962)，105—45]上的“从有效亲和力到化学平衡”一文讨论了化学热力学，将物理化学出现的背景交代清楚了。R. G. Dolby 在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 7 [(1976)，297—404]上发表的“溶液理论的争论：物理化学中不同意见的讨论”对由溶液理论引起的争论作了详细的说明。在 *Dictionary of scientific biography*，14：455—69 上由 E. N. Hiebert 和 H. G. Korber 撰写的“奥斯特瓦尔德”条目，也是对这个问题研究的详细资料，内中文献很全。在由 D. H. D. Roller 主编的 *Perspectives in the history of science and technology* [(Norman，Okla，1971)，pp. 67—86]上，E. N. Hiebert 写的“唯能论的争论和新热力学”一文，评述了奥斯特瓦尔德、普朗克、玻耳兹曼围绕热力学概念的争论。M. J. Klein 在 *Natural Philosopher* 3 [(1963)，83—108]上写的“普朗克、熵和量子，1901 年—1906 年”一文，对普朗克在热力学第二定律基础上所作的推广工作作了全面的分析。

跋：力学世界观的衰落

M. J. Klein 在 *Centaurus* 17[(1972)，58—82]上写了一篇题为“19 世纪末的力学解释”的文章，该文研究了赫兹和玻耳兹曼在探讨力学解释纲领时的论述。重要的支持者的有关论证可从 H. Hertz 的译本中找到：译者为 D. E. Jones，书名为 *The principles of mechanics presented in a new form*，(London，1899；重印 New York，1956)，这是一本经典著作。L. 玻耳兹曼的论文集：*Theoretical physics and philosophical problems*，主编为 B. McGuinness（Dordrecht，1974），这是玻耳兹曼很有名的普及性文章的汇总。E·马赫的 *The science of mechanics：a critical and historical account of its development*（La Salle，Ⅲ.，1960）一书，描述了对力学前沿观点批判的过程。关于马赫，也有重要的文献。如 J.

T. Blackmore 的 *Ernst Mach: his life, work and influence* (London, 1972), 此书对马赫的思想作了全面的说明. 关于马赫的专题学术讨论可见 *Synthese* 18[(1968),132—301], 马赫的论文集见 R. S. Cohen 和 R. J. Seeger 主编的 *Ernst Mach: physicist and philosopher* 一书, 即 *Boston Studies in the Philosophy of Science* Ⅵ (Dordrecht, 1970), 本书还包括对特殊课题的研究。E. N. Hiebert 在 *Dictionary of scientific biography* 8: 595—607 中的"马赫"词条中, 还包括了全部的文献目录。

对相对论的由来有过大量的研究文章, R. McCormmach 发表在 *Historical Studies in the Physical Sciences* 2 [(1970), 41—87] 上发表的"爱因斯坦, 洛伦兹和电子论"一文, 是狭义相对论的一篇精彩范文, 此文对爱因斯坦的物理世界观作了阐释性的分析。G. Holton 的 *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein* [(Cambridge, Mass., 1973), pp. 165—352] 讨论了狭义相对论的创建。

术语、姓氏英汉对照

affinities(chemical) 亲和力(化学的)
Airy, George Biddell 爱里,乔治·比德尔
Alembett, Jean Lerond d' 达朗伯,吉恩·里洛德
Ampére, André marie, 安培,安德鲁·玛丽
analogy, physical 对应物(物理学的)
Arago, François 阿拉戈,弗朗索瓦
Arrhenius, Svante 阿累尼乌斯,斯维特
atomism, chemical 原子论,化学的,
vortex 原子涡旋
Avogadro, Amedeo 阿伏伽德罗,阿米蒂欧
Bernoulli, Daniel 伯努利,丹尼尔
Bernoulli, Johnann 伯努利,约翰
Berthollet, Claude Louis 贝陀莱、克劳德·路易斯
Berzelius, Jöns Jacob 伯齐留斯,琼·雅可布
Biot, Jean Baptiste 毕奥,吉恩·巴帕蒂斯特
Boltzmann, Ludwig 玻耳兹曼,路德维希
Boscovich, R.J. 博斯哥维奇,R·J·
Brodie, Benjamin Collins 布罗迪,本杰明·柯林斯
Bunsen, Robert 本生,罗伯特
caloric 量热的,热素的
Cannizzaro, Stanislao 卡尼扎罗,斯丹尼斯劳
Carnot, Lazare 卡诺,拉扎勒
Carnot, Sadi 卡诺,塞迪
Cauchy, Augustin Louis 柯希,奥古斯丁·路易斯

Cavendish, Henry 卡文迪许,亨利

chemistry 化学

- organic 有机化学
- physical 物理化学

Clairaut, A. C. 克莱奥特,A·C·

Clapeyron, Emile 克拉珀龙,依曼耳

Clausius, Rudolf 克劳修斯,鲁道夫

- entropy 克劳修斯熵
- kinetic theory of gases 克劳修斯气体运动论
- molecular models 克劳修斯分子模型
- thermodynamics 克劳修斯热力学

Clifford, William Kingdon 克里福德,威廉·金顿

Colding, Ludvig, 科尔亭 路德维希

cosmogeny 宇宙学

- nebular hypothesis 宇宙星云说

Coulomb, Charles Augustin 库仑,查尔斯·奥古斯丁

Dalton, John 道尔顿,琼,

Davy, Humphry 戴维,赫姆夫莱

disgregation 非聚

displacement (of electricity) (电)位移

Duhem, Pierre 迪昂,皮尔埃

Dumas, Jean Baptiste 杜麦斯,吉恩·巴帕蒂斯特

dynamical explanations 动力学解释

dynamo 动力

Einstein, Albert 爱因斯坦,阿尔伯特

electromagnetism 电磁学

electron, concept of 电子的概念

energetics 唯能学

engines (heat)　(热)机,引擎
energy　能量
　conservation of　能量守恒
　dissipation of　能量耗散
entropy　熵
equipartion theorem　能量均分定理
ether, concept of　以太,以太的概念
　drag　以太拖曳
　elastic solid　弹性固态以太
　electromagnetic　电磁以太
　luminiferous　发光以太
　plenum　以太介质
Euler, Leonhard　欧拉,莱昂哈德
Ewart, Peter,　厄瓦耳,彼得
Faraday, Michael　法拉第,迈克尔
　conversion of force　力的转化
　electromagnetic induction　电磁感应
　electrostatics　静电学
　electro-tonic state　电张弛态
　field concept　场的概念
　lines of force　力线
　magnetism　磁学
　matter theory　物质论
field　场
concept of　场的概念
Fitzgerald, George Francis　斐茨杰拉德,乔治·弗朗西斯
Fizeau, Hippolyte　斐索,希波里特
force　力

central 中心力

conversion of 力的转化

lines of 力线

living (*vis viva*) 活力

vital 活力

Fourier, Joseph 傅立叶,约瑟夫

Fraunhofer, Joseph 夫琅和费,约瑟夫

Fresnel, Augustin Jean 菲涅耳.奥古斯丁·吉恩

gases 气体

caloric theory of 气体热素说

kinetic theory of 气体运动论

specific heats of 气体比热

statistical theory of 气体统计理论

transport processes of 气体输运过程

Gauss, Carl Friedrich 高斯,卡尔·弗里德里希

Gerhardt, Charles Frēdéric 杰哈德,查尔斯·弗里德里克

Gibbs, Josiah Willard 吉布斯,约西亚·维拉德

Green, George 格林,乔治

Grove, William Robert 格罗夫.威廉·罗伯特,

heat, analytical theory of 热的解析理论

caloric theory of 热的热素说

ether theory of 热的以太说

mechanical equivalent 热的机械等当性

wave theory of 热的波动说

Heaviside, Oliver 海维赛德,奥列弗

Helmholtz, Hermann von 亥姆霍兹,赫尔曼·冯

central forces 中心力

conversion of forces 力的转化

light: aberration of 光的弯曲
    diffraction of 光的绕射
    electromagnetic theory of 光的电磁理论
    emission theory of 光的辐射理论
    fluid theory of 光的流体理论
    interference of 光的干涉
    polarisation of 光的极化(偏振)
    wave theory of 光的波动说
Lodge, Oliver 洛奇,奥列弗
Lorentz, Henrik Antoon 洛伦兹,亨里克·恩托
    contraction 收缩
    electron theory 电子论
Lorenz, Lodwig 洛伦茨,路德维希
Loschmidt, Joseph 洛施密特,约瑟夫
MacCullagh, James 麦克考拉夫,詹姆斯
Mach, Ernst 马赫,恩斯特
magneto-optic rotation 磁光转动
Malus, Etienne Louis 马吕斯,埃蒂恩纳·路易斯
Maxwell, James Clerk 麦克斯韦,詹姆斯·克拉克
    'demon' paradox 麦克斯韦'妖'佯谬
    dynamical explanation 动力学解释
    electro-magnetic theory of light 光的电磁理论
    ether 以太
    field concept of 麦克斯韦的场概念
    kinetic theory of gases 气体运动论
    lines of force 力线
    mechanical models 力学模型
    molecular physics 分子物理学

Richter, Jeremias Benjamin 里切特尔,杰里迈亚斯·本杰明

Riemann, Bernhard 黎曼,伯恩哈德

Rumford, Count (Benjamin Thompson) 伦姆福德,伯爵(本杰明·汤姆孙)

Schuster, Arthur 舒斯特,阿瑟

Siemens, Werner 西门子,韦纳

spectroscopy 光谱

Stallo, Johann Bernhard 斯特洛,约翰·伯恩哈德

Stewart, Balfour 斯图尔特,巴尔福

Stokes, George Gabriel 斯托克斯,乔治·加布里埃尔

Strutt, John William (Lord Rayleigh) 斯特拉特,约翰·威廉(瑞利勋爵)

Tait, Peter Guthrie 泰特,彼得·戈塞里

thermodynamics 热力学

chemical 化学热力学

law of 热力学定律

statistical 统计热力学

Thomson, James 汤姆孙,詹姆斯

Thomson, Joseph John 汤姆孙,约瑟夫·琼

Thomson, Sir William (Lord Kelvin) 汤姆孙,威廉爵士(开尔文勋爵)

dissipation of energy 能量耗散

electrostatics 静电学

energy physics 能量物理学

ether concepts 以太概念

irreversibility 不可逆性

magneto-optic effect 磁光效应

mechanical theory 机械论

thermodynamics 热力学